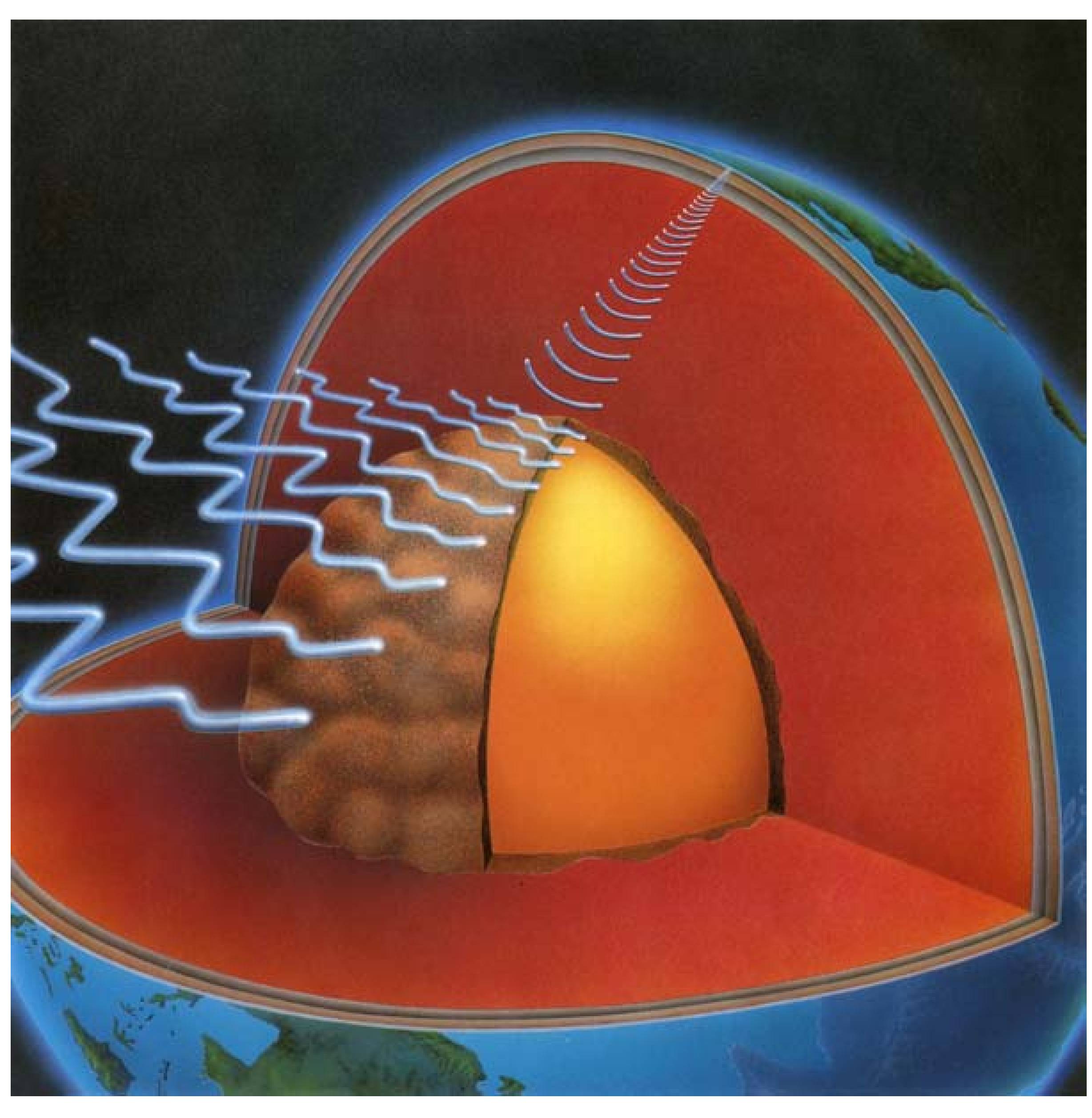
INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

DIRAC Y LA BELLEZA DE LA ANTIMATERIA

VIAS NEUROLOGICAS DEL MIEDO

LA VIDA Y LA MUERTE, INDICADORES ECONOMICOS



ONDAS SISMICAS

JULIO 1993
700 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa



Julio de 1993 Número 202



Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

J. M. García de la Mora: *La vida y la muerte como indicadores económicos*; A. Peláez: *Donde el núcleo limita con el manto*; S. Torres: *Respuesta de las células al estrés*; J. L. Comellas: *El poder de los mapas*; E. Santiago: *Neurobiología del miedo*; M. García Doncel: *Dirac y la belleza de la física*; R. Pascual: *Cosmos inconstante;* J. Vilardell: *Hace...* y *Taller y laboratorio*; Ana M.ª Rubio: *Ensayo*; Shigeko Suzuki: *De cerca*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*

Ciencia y sociedad:

G. Colmenarejo y F. Montero, M. Puigcerver, Juan P. Adrados, Luis Bou y J.-D. Ros

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

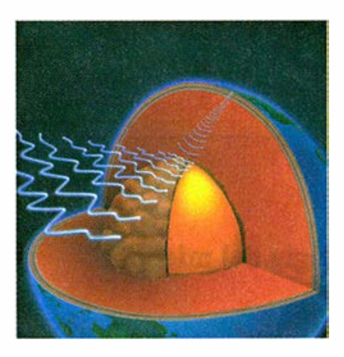
Libros:

Domingo Fletcher, F. Gracia, Luis Alonso y Juan P. de Nicolás

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Tomo Narashima

Página	Fuente
6-7	© 1986 Raghubir Singh
8-12	Johnny Johnson
13	A. Tannenbaum/Sygma
15	Adam M. Dziewonski, U. de Harvard, y John H. Woodhouse, U. de Oxford; Photoshop by Dimitry Schidlovsky
16-20	Ian Worpole
21	I. Worpole (*iz.* y *dcha.*), D. L. Peck (*centro*)
22-23	E.P.M. Candido y E. G. Stringham, U. de la Columbia Británica; Journ. Exp. Zool., © John Wiley & Sons, Inc.
24	J. Bonner, U. de Indiana; D. Schidlovsky (*arriba*), D. Darwin/ Photo Researchers, Inc. (*centro*), S. Lindquist, U. de Chicago (*abajo*)
25-28	Dimitry Schidlovsky
43	Cortesía de Jaume Llistosella
44	José Ruiz-Herrera y A. Aragón
45	J. Ruiz-Herrera y A. Cárabez-Trejo
46	A: C.E. Bracker, S. Bartricki y A.
47	Flores; B-E: C.E. Bracker, S. Bartricki y J. Ruiz- Herrera
48	A. Cárabez-Trejo y J. Ruiz-Herrera
50-51	Tom Van Sant/GeoSphere Project (*abajo*), NASA (*arriba a la derecha*)
52	John W. Williams, Universidad de Pittsburgh; Gabor Kiss (*arriba*), *Commentary on the Apocalypse of Saint John*, por Beato de Liebana, Biblioteca Pierpont Morgan (*abajo*)
53	*arriba*: de *Geography*, por Claudius Ptolemy, The Murray Collection; *centro*: de *Cary's New Universal Atlas*, Bib. de la Inst. Smithsoniana; Ken Pelka (*fotógrafo*); *abajo*: Archivo Nac. de Antropología, Inst. Smithsoniana; Victor Krantz
54	William F. Haxby
55	*arriba*: Conservación Internacional; *centro*: W. T. Sullivan, Hansen Planetarium Publications; Beth Phillips (fotógrafo); *abajo*: © Stuart L. McArthur; Beth Phillips (*fotógrafo*)
57	Ned H. Kalin
58-59	C. Donner (*arriba*), N. H. Kalin (*abajo*)
60	Carol Donner
61	N. H. Kalin (*arriba*), C. Donner (*abajo*)
62	Ned H. Kalin
65	AIP Meggers Gallery of Nobel Laureates
66	Cortesía de AIP Emilio Segrè Visual Archives (*izda.*), UPI/Archivo Bettmann (*centro*), cortesía de AIP Niels Bohr Library; Francis Simon (*dcha.*)
67	Cortesía de AIP Emilio Segrè Visual Archives; Francis Simon
68	Univ. Est. Florida, Tallahassee
70-71	George Retseck
72	COMPTEL team
74	Michael Goodman
75-76	Inst. Max Planck, Garching, Alemania
77	Observatorio Lund; cortesía de G.
78	Fishman, NASA. Robert Prochnow
85-86	Documentos Pour la Science



La ilustración de portada muestra una vista del interior de la Tierra. En ella se representa la reflexión de una onda sísmica en la capa D'', de singulares características, y la distorsión que allí sufre. Estas perturbaciones de las ondas sísmicas muestran que la región interpuesta entre manto y núcleo varía en espesor y composición. Experimentos que simulan las condiciones del interior terrestre indican que quizá sea la región de mayor dinamismo químico (véase "Donde el núcleo limita con el manto", por Raymond Jeanloz y Thorne Lay, en este número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
Juan Pedro Campos
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; John Rennie, Russell Ruthen, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan; Marguerite Holloway; *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.400	15.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

... *cincuenta años*

SCIENTIFIC AMERICAN: «Experimentos realizados a lo largo de los últimos ocho años llevan a la conclusión de que hay átomos de gases (oxígeno, hidrógeno o nitrógeno) que se disuelven en la estructura cristalina de algunos metales lo mismo que la sal en el agua. Esos corpúsculos de gas 'aflojan' entonces los electrones de esa estructura, haciendo que sean emitidos del metal con mayor facilidad cuando se aplica calor. 'Esta explicación', según afirmó hace poco el doctor Harvey C. Rentschler, 'debería llevar a una mayor duración de las lámparas y a ahorros en los aparatos que dan energía a los filamentos.'»

«Habiendo adquirido un déficit de vitamina B durante varias semanas, ¿necesita una persona el mismo tiempo para recuperarse? Las generalizaciones son peligrosas pero, por lo general, la recuperación neurológica y mental es rápida; la de los tejidos, mucho más lenta. Como dice *Nutrition Reviews* en relación a la tiamina (vitamina B_1): 'Hay pruebas abundantes de que la administración de tiamina a un animal con una carencia aguda de ella produce una remisión espectacular de los síntomas neurológicos en cosa de minutos, y una recuperación completa en un plazo de días.'»

«Si, como parece probable, en Marte hay vegetación, es que se ha desarrollado vida en dos de los tres planetas de nuestro sistema donde hay alguna posibilidad de ello. Siguiendo esta pauta, parecerá ahora también probable que el número de mundos habitados en nuestra galaxia sea considerable. Pensar que los hay por millares, o incluso más, parece ahora más razonable que suponer que nuestro planeta sea la única morada de la vida y la razón. Las formas que pueda revestir la vida en esos incontables mundos es una cuestión ante la cual puede acobardarse la mente más visionaria. La imaginación, en ausencia de más conocimientos de los que poseemos sobre la naturaleza de la vida, no sirve al propósito. Nada se opone, empero, a suponer que, en condiciones favorables, puedan haber evolucionado organismos que igualen o sobrepasen al hombre en raciocinio y conocimiento de la naturaleza y también, confiemos en ello, en la armonía consigo mismos. —*Henry Norris Russell.*»

... *cien años*

SCIENTIFIC AMERICAN: «El Museo Británico ha recibido un mamífero nuevo muy interesante. Es una especie de rata ictiófaga de los arroyos montañosos del Perú Central. Tiene un tamaño aproximado al de una rata doméstica, pero su cabeza está aplastada, sus bigotes son de cerdas fuertes y abundantes, y sus ojos y orejas, muy pequeños. Es absolutamente ictiófago y, a causa de ello, tiene los incisivos modificados para adaptarse a la captura de presas móviles y resbaladizas, de tal modo que las puntas externas de esos dientes las tiene muy desarrolladas en forma de puntas largas y afiladas. Además, tiene unos intestinos modificados hasta carecer casi de ciego, órgano que en los múridos vegetarianos es siempre de gran tamaño y capacidad. No existe otro roedor que, como este *Ichthyomys stolzmanni*, nombre que se propone para el nuevo descubrimiento, viva nada más que de peces y excluya la dieta vegetariana.»



La gran noria

«Puede que para los aficionados al tiro con rifle resulte de interés conocer el método siguiente para comprobar el efecto de la gravedad sobre las balas. Apunte al blanco con la mira vertical sobre el eje geométrico del calibre del rifle. Haga una marca en el impacto. Seguidamente déle la vuelta al arma para colocar la mira exactamente debajo del eje del calibre. Con el arma en esa posición, apúntela al blanco como antes y marque el punto del impacto. Divida por 9,81 la diferencia entre las alturas de los dos impactos y saque la raíz cuadrada. Obtendrá así el tiempo que tardó la bala en recorrer la distancia. Si ahora divide la distancia por ese tiempo tendrá la velocidad del proyectil en metros por segundo. —J. A. G., *Grand Rapids, Michigan.*»

«Las 320 tablillas de Tell-el-Amarna fueron descubiertas en 1887 por una mujer fellah entre las ruinas del palacio de Amenofis IV, conocido como Akhenatón, a unos 290 km al sur de El Cairo. Contienen una correspondencia política de enorme interés, fechada hará unos 3370 años. Muchas de ellas proceden de Palestina y están escritas por príncipes amonitas, fenicios, filisteos, etc., casi todos abrumados por una misma carga: 'Enviad, os ruego, mi Señor, carros y hombres para guardar la ciudad del Rey.' Entre los enemigos ante los cuales así se solicita ayuda están los abiri, fácilmente reconocibles como los hebreos. La fecha fija como exacta la de la Biblia (*Reyes*, I, 1).»

«El maravilloso 'tiovivo' diseñado por el ingeniero George W. G. Ferris, de Pittsburgh, ya está acabado en la Exposición Colombina de Chicago. Este curioso artefacto constituye un objeto más que notable y atractivo. Está provisto de treinta y seis barcazas oscilantes, con cabida cada una para cuarenta pasajeros; así pues, a cada vuelta de la rueda eleva a 1440 personas a una altura de más de 75 metros.»

La vida y la muerte como indicadores económicos

La información aportada por los índices de mortalidad, cuando se emplean en el análisis de los logros económicos, aclara aspectos críticos de la organización de la sociedad

Amartya Sen

A la economía no le conciernen sólo la renta y la riqueza, sino también el modo de emplear esos recursos como medios para lograr fines valiosos, entre ellos la promoción y el disfrute de vidas largas y dignas. Pero si el éxito económico de una nación se juzga sólo por su renta y por otros indicadores tradicionales de la opulencia y de la salud financiera, como se hace tan a menudo, se deja entonces de lado el importante objetivo de conseguir el bienestar. Los criterios más convencionales de éxito económico se pueden mejorar incluyendo evaluaciones de la capacidad de una nación o una región para alargar la vida de sus habitantes y elevar su calidad.

Aunque el mundo, en su globalidad, conozca hoy una prosperidad sin precedentes, no han desaparecido las bolsas de hambruna y malnutrición crónica. Lo mismo en países industrializados que en el Tercer Mundo siguen siendo endémicas enfermedades que pueden desarraigarse, muertes que son evitables. Detrás de esos problemas hay siempre una razón económica. Complementando los indicadores tradicionales con estadísticas que se refieran más directamente al bienestar, pueden evaluarse de manera fructífera las ventajas y las deficiencias de enfoques económicos alternativos. Por ejemplo, un país puede tener un producto nacional bruto (PNB) *per capita* mucho más alto que el de otro y, al mismo tiempo, una esperanza de vida muy inferior a la de éste cuando los ciudadanos del primero no puedan acceder con facilidad a los recursos sanitarios y educativos. Los datos de mortalidad permiten enjuiciar la política seguida y reconocer aspectos cruciales de la penuria económica en ciertas naciones o en grupos concretos dentro de las naciones.

AMARTYA SEN, docente de la Universidad de Lamont, enseña también economía y filosofía en la de Harvard. Tras formarse en Calcuta y Cambridge, dio clases en Delhi, Londres y Oxford. Ha presidido la Sociedad Econométrica, la Asociación Económica Internacional y la Asociación Económica de la India, y es hoy presidente electo de la Asociación Económica Americana. Su interés investigador se centra en las teorías de la elección y la decisión sociales, la economía del bienestar y la filosofía moral y política.

Que las estadísticas de mortalidad son un instrumento muy útil para el análisis socioeconómico se ve con sólo examinar algunos problemas de distintas partes del mundo: las hambrunas, que a veces se dan incluso en lugares donde no falta el alimento; la baja esperanza de vida, frecuente en países con PNB alto; las mayores tasas de mortalidad para las mujeres que para los hombres en zonas de Asia y Africa; y los ínfimos porcentajes de supervivencia de los afroamericanos en comparación no sólo con los blancos de los EE.UU. sino también con los habitantes de países paupérrimos.

A menudo, buscándole explicaciones económicas al hambre, se hace depender de la política de producción y distribución de los alimentos, política que suele basarse en el dato estadístico agregado de la cantidad de alimentos disponible por persona en el país; a este indicador le otorgó ya preeminencia Thomas Richard Malthus a comienzos del siglo XIX. Pero puede haber hambre con un valor elevado de ese guarismo. La confianza en esas simples cifras crea muchas veces una engañosa sensación de seguridad, y, con ello, hace que los gobiernos eludan el tomar las medidas oportunas.

Para comprender más adecuadamente el fenómeno del hambre hay que examinar los canales de adquisición y distribución de los alimentos, y estudiar cómo y en razón a qué tienen acceso a éstos los distintos sectores de la sociedad. La hambruna sobreviene porque una fracción importante pierde los medios para obtener comida, por culpa del paro, la depreciación salarial o una grave alteración del tipo de cambio entre la venta de bienes y servicios y la compra de alimentos. La información acerca de estos factores y de los demás procesos económicos que influyen en la capacidad de procurarse comida debería estar en la base de las políticas encaminadas a evitar la escasez y aliviar el hambre.

La hambruna de Bangladesh en 1974 es prueba de que hay que ampliar mucho la apreciación de los factores que originan tamaños desastres. Aquel año la cantidad de alimento *per capita* en Bangladesh era elevada, mayor que cualquier otro año entre 1971 y 1976. Pero las inundaciones que hubo desde finales de junio hasta agosto impidieron el trasplante del arroz (el proceso por el que los plantones de arroz son trasladados de los lugares de siembra a las ordenadas hileras de los bancales anegados) y otras prácticas agrícolas en el distrito norte. Aquello arruinó, a su vez, la contratación de peonadas en el campo, donde los jornaleros viven al día. Sin salario, estos trabajadores no pudieron comprar ya mucha comida, y llegaron a ser víctimas del hambre.

El pánico agravó todavía más la situación. Aunque no se esperaba recoger la principal cosecha de arroz, que había sido dañada sólo en parte por las inundaciones, hasta diciembre, el temor a una posible escasez promovió inmediatamente el aprovisio-

namiento precautorio y el acaparamiento. Los precios se dispararon. Al encarecerse el arroz y otros cereales, se les hizo imposible a los bangladeses pobres la compra de su comida. Cuando los precios de los alimentos alcanzaron, en octubre, la cota más alta, también fue máxima la mortandad.

Llegada la cosa a ese punto, el gobierno, con evidente retraso, empezó a dirigir ayudas a gran escala. Su respuesta se retrasó por varias razones, una de ellas que los EE.UU., en represalia porque Bangladesh exportaba yute a Cuba, suspendieron los envíos de alimentos. Pero uno de los mayores obstáculos fue la engañosa sensación de seguridad que originaron las elevadas cifras del volumen de subsistencias disponibles. Una vez puestas en marcha las ayudas, el mercado comenzó a readaptarse a una estimación más realista de la cosecha de invierno: las pérdidas de grano fueron mucho menores de lo que antes se había supuesto. En noviembre, los precios de los alimentos empezaron a bajar; a finales de ese mismo mes, se cerró la mayoría de los centros de auxilio. El hambre desapareció casi por completo antes incluso de que se pusiese fecha a la recogida de la cosecha parcialmente dañada.

Como se ha dicho más arriba, las proporciones de alimento *per capita* eran altas ese año en Bangladesh (porque en diciembre de 1973 se había recogido una cosecha magnífica). El que sobreviniese luego la hambruna pone de manifiesto lo desastroso que puede ser fiarse sólo de las cifras que expresan la cantidad global de alimentos. Esa cantidad nunca la comparte equitativamente toda la población, ni la disponibilidad es absoluta. Además, el almacenamiento privado o comercial de productos salen al mercado, o se retiran, en respuesta a los incentivos monetarios y cuando se espera que haya cambios de precios.

Frecuentemente ha habido hambrunas cuando las estadísticas mostraban poca o ninguna disminución de las subsistencias. Por ejemplo, durante el hambre que azotó Bengala en 1943, la merma del poder adquisitivo de los salarios que percibían los jornaleros del campo fue lo que hizo que se extendiese la inanición. De manera similar, en 1973, una hambruna en la provincia etíope de Wollo fue causada por una sequía que allí se prolongó mucho y que empobreció a la población de aquellos lugares, si bien no redujo mucho la producción de alimentos en el conjunto de la nación. Como la capacidad adquisitiva de los habitantes de Wollo quedó muy menguada, resultó que en esta provincia los precios fueron a menudo más bajos que en cualquier otra parte del país; de he-



1. MUCHACHAS ESTUDIANTES del estado de Kerala (India) paseando. En Kerala, con un producto nacional bruto de los más bajos del país, son altos los índices de alfabetización para ambos sexos. Pese a su extrema pobreza, el compromiso público a favor de la educación, la salud y la mejora de la condición de la mujer ha alfabetizado y elevado la esperanza de vida de la población. Nos muestra ello que ciertos indicadores del desarrollo económico, como el PNB, pueden ser insuficientes.

cho, algunas subsistencias se sacaron de la región castigada por el hambre para venderlas en zonas de más abundancia. (Este trágico giro de los acontecimientos se dio también durante la década de 1840, cuando de una Irlanda hambrienta se enviaban alimentos a una Inglaterra próspera.)

Hay varios modos de evitar el hambre. En Africa y en Asia contribuiría obviamente a lograrlo la extensión de los cultivos, no sólo porque ello rebajaría el coste de la manutención, sino también porque aumentaría el poder adquisitivo de poblaciones empleadas en las faenas del campo. Para incrementar esta producción habría que ofrecer incentivos que hicieran rentables las inversiones agrarias. Se necesitarían también políticas de regadíos y fomento de la transformación tecnológica (que en Africa está muy descuidada).

Pero no basta con incrementar la producción de alimentos. Si bien se mira, dada la variabilidad del clima, concentrar demasiado los recursos de una nación en la agricultura y ganadería puede hacer a la población más vulnerable respecto a las sequías y las inundaciones. Especialmente en el Africa subsahariana es muy necesaria una diversificación de la producción que incluya la gradual expansión de la industria. Cuando la gente tiene medios económicos se puede comprar comida, trayéndola, si es preciso, de otras partes.

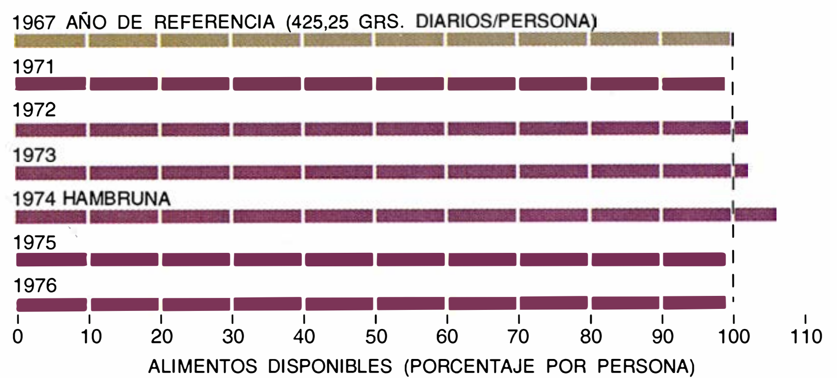
Por más éxito que tengan el auge y la diversificación de la producción en muchos países africanos y asiáticos, millones de personas seguirán sufriendo devastadoras inundaciones, sequías y otros desastres. Que en esas situaciones no sobrevenga la hambruna se puede conseguir incrementando el poder adquisitivo de los grupos más afectados, los menos capaces de obtener comida. Con planes públicos de empleo se les puede proporcionar ingresos. Los trabajadores entonces contratados competirán con los otros por la participación en el total de subsistencias existente. El crear trabajo asalariado hace, desde luego, que los precios suban, pues tal práctica, al revés que la de dejar que el indigente se muera de hambre, intensifica la demanda total de alimentos, pero ello puede ser en realidad beneficioso, porque trae consigo el que otros grupos no tan necesitados consuman menos. Procediendo de este modo se distribuyen más equitativamente las escasas subsistencias, y con su reparto se aleja el fantasma del hambre.

Tales proyectos de trabajo público para evitar el hambre no impondrían, por lo general, una extraordinaria carga financiera al gobierno de una nación pobre. Aunque en cifras absolutas la cantidad de víctimas de una hambruna puede ser elevada, sólo suele representar una pequeña proporción del conjunto de la sociedad: comúnmente el hambre aflige a menos del 5 al 10 por ciento de la población. Como los hambrientos están también entre los más pobres, su parte de la renta o del consumo alimentario oscila a menudo entre el 2 y el 4 por ciento. De manera que no será imposible la exacción de los recursos fiscales precisos para recuperar los ingresos perdidos por ellos.

Varios ejemplos ilustran el éxito de las medidas de empleo público para evitar el hambre. En el estado indio de Majarasjtra, una serie de prolongadas sequías entre 1972 y 1973 hizo cundir el paro agrícola y redujo a la mitad la producción. Los programas de obras públicas —construcción de carreteras y pozos— salvaron del hambre a los trabajadores afectados, que pudieron así competir con los demás en la adquisición de los escasos alimentos. Aunque el promedio de comida disponible por persona fue entonces en Majarasjtra muy inferior al de los países del Sahel (Burkina Faso, Mauritania, Malí, Níger, Chad y Senegal), pocos sucumbieron al hambre en Majarasjtra. El Sahel, en cambio, experimentó una gran hambruna, porque la escasez no se distribuyó allí tan por igual.

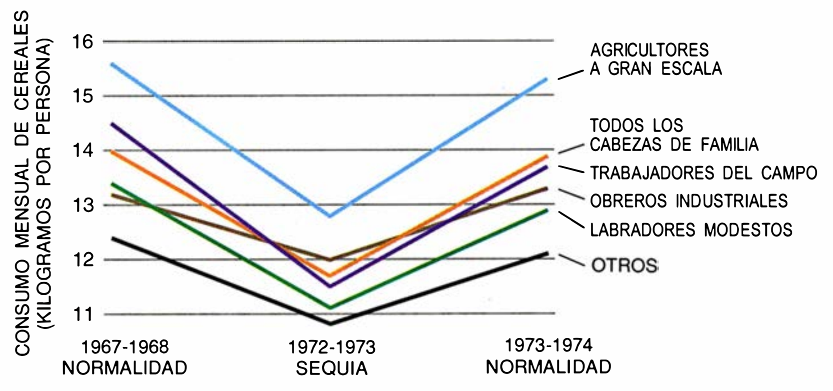


2. Bangladesh padeció en 1974 una hambruna, aunque se disponía allí de más cantidad de alimento por persona que en cualquier otro año del quinquenio de 1971 a 1976. (Año de referencia: 1967).



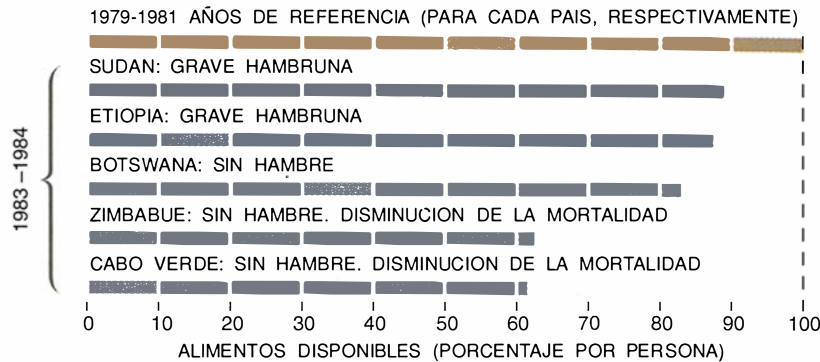


3. El estado de Majarajtra, en la India, evitó el azote del hambre durante una larga sequía mediante trabajos públicos que proporcionaron ingresos a los necesitados. Aunque el consumo individual de cereales disminuyó, la escasez fue compartida por todos.





4. **Botswana, Zimbabue y Cabo Verde produjeron menos alimento en 1983-1984 que en años anteriores, pero no padecieron hambre, porque organizaron planes de trabajo público. Sudán y Etiopía, con recesiones no tan graves, se las arreglaron peor y sufrieron más.**



La India ha empezado a evitar el hambre siguiendo, sobre todo, estos métodos. Su última hambruna terrible la padeció en 1943, cuatro años antes de independizarse de Inglaterra. Aunque en 1967, 1973, 1979 y 1983, a resultas de desastres naturales, disminuyó drásticamente la cantidad de alimento disponible, se logró, con todo, evitar las hambres haciendo que los sectores de la población más amenazados recuperasen el poder adquisitivo que el desempleo les quitara.

Paliar el peligro de hambre por medio de programas laborales que proporcionen ingresos a los necesitados se diferencia de la común práctica de congregar a la gente en campos de refugiados y tratar sólo de mantenerla. Este enfoque, adoptado en Africa, suele retardar más la solución y puede imponer a los funcionarios gubernamentales una insoportable tarea organizativa. Además, el hacinamiento en campamentos, lejos del hogar, interrumpe la actividad productiva normal de laboreo del campo y atención a los rebaños, lo que socava a su vez la producción futura. Esas concentraciones pueden también dar al traste con la vida familiar. Un último, pero no menor, inconveniente es que los campos de refugiados se conviertan, a menudo, en terreno abonado para la propagación de enfermedades contagiosas.

En cambio, el pagar con dinero contante a quienes se emplea en obras públicas no pone en peligro el bienestar económico y social de los así ayudados, contribuye a aumentar la producción y a fortalecer los mecanismos de mercado existentes e impulsa la eficacia del comercio y del transporte. Esta forma de proceder refuerza la infraestructura económica, no la debilita.

Inevitablemente, las medidas fiscales beneficiosas están en estrecha relación con la política. Aunque el método de los trabajos públicos depende del mercado, no es un sistema de libre mercado: requiere que intervenga el gobierno ofreciendo empleo. También puede ser conveniente la propiedad pública de unas reservas siquiera mínimas de alimentos. Estos almacenajes harán creíbles las amenazas del gobierno en el caso de que los especuladores intenten manipular el mercado: si los comerciantes retienen artificiosamente los víveres esforzándose por subir sus precios, el gobierno podrá responderles inundando el mercado para hundir precios y ganancias.

El hambre es evitable si el gobierno tiene el incentivo necesario para actuar a tiempo. Es significativo que ningún país democrático con una prensa relativamente libre haya padecido jamás una hambruna (si bien es cierto que unos se las han arreglado mejor que otros para sortear las dificultades). Y esta generalización vale tanto para las democracias pobres como para las ricas. Una hambruna puede azotar a millones de personas, pero rara vez alcanza a los dirigentes. Si éstos han de procurar que se les reelija y la prensa es libre para informar sobre la plaga de hambre y para criticar las medidas políticas, existe ahí un incentivo para que los gobernantes emprendan acciones preventivas. En la India, por ejemplo, la hambruna cesó con la independencia. Un sistema democrático pluripartidista y una prensa relativamente libre hicieron obligatoria la actuación del gobierno.

En cambio, aunque la China posrevolucionaria ha logrado mucho más éxito que la India en cuanto a expansión económica y a sanidad, no ha conseguido librarse de las hambrunas. Una de ellas ocurrió entre 1958 y 1961, tras el fracaso del plan agrícola del Gran Salto Adelante. La falta de oposición política y de prensa libre posibilitó que el desastroso programa continuara vigente tres años más y, a consecuencia de ello, la muerte se cobró un tributo de entre 23 y 30 millones de seres humanos.

Muchos países del Africa subsahariana, entre otros Somalia, Etiopía y el Sudán, han pagado muy caros los gobiernos militares. Los conflictos y las guerras conducen al hambre no sólo porque son económicamente ruinosos sino también porque propician la dictadura y la censura. Países subsaharianos relativamente democráticos, tales como Botswana y Zimbabue, han sido, en general, capaces de precaverse contra el hambre.

Desde luego que hasta un país pobre no democrático puede evitar la hambruna por pura suerte: si no sobreviene ninguna crisis o si un déspota benévolo adopta medidas eficientes para aliviar a los hambrientos. Pero la democracia es una garantía más eficaz de que se actuará cuando haga falta.

Los datos de la mortandad causada por las hambrunas atraen la atención hacia las deficiencias de ciertas estructuras económicas y políticas. Las tasas de mortalidad crónicamente altas revelan fallos no tan extremados, pero sí más persistentes. Las medidas económicas relacionadas con la baja mortalidad infantil y con el aumento de esperanza de vida son muy diversas. Varios países que redujeron asombrosamente la mortalidad infantil entre los años 1960 y 1985 experimentaron un crecimiento económico de una rapidez antes desconocida, entre ellos Hong Kong, Singapur y Corea del Sur. Esas naciones son ahora ricas, en términos de PNB. Pero han tenido éxito en esto varias naciones que no han salido de la pobreza: China, Jamaica y Costa Rica entre otras.

El hecho de que un país pobre pueda realizar mejoras sanitarias o aumentar la esperanza media de vida de sus habitantes hasta un punto que, en muchos aspectos, emula los logros de naciones más ricas, encierra notables implicaciones políticas. Esta capacidad pone en cuestión la socorrida tesis de que un país subdesarrollado

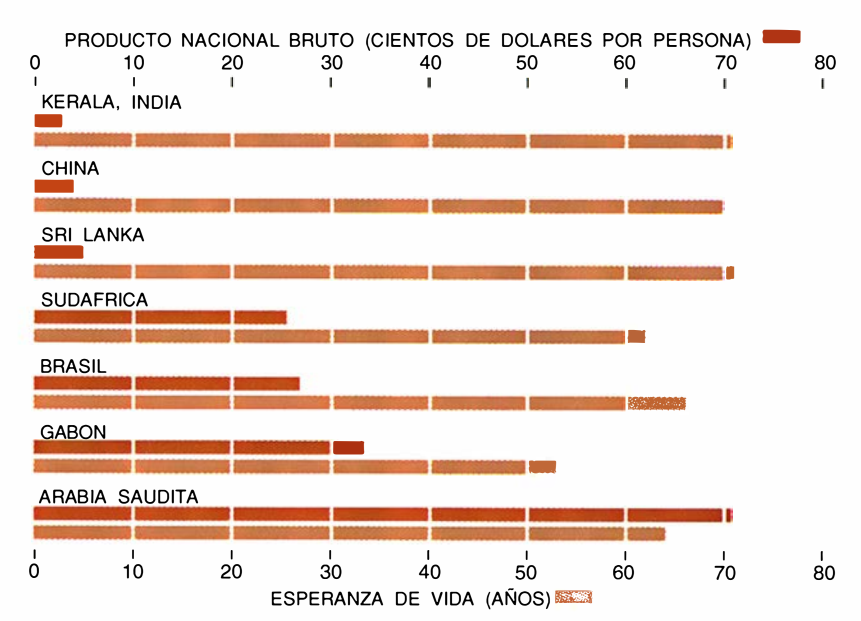
no puede permitirse ningún dispendio en sanidad ni en educación mientras no sea más rico y financieramente sólido. Semejante opinión ignora el coste relativo. Educación y sanidad son intensivas en trabajo, como lo son muchos de los más eficientes servicios médicos. Tales servicios cuestan mucho menos en una economía en la que el trabajo es barato que en la de un país más rico. Así, aunque el país pobre tiene menos para gastar en esos servicios, también necesita gastar menos en ellos.

Los esfuerzos a largo plazo que vienen realizando Sri Lanka y el estado de Kerala, en la India (cuya población de 29 millones es mayor que la del Canadá), ilustran los méritos del gasto público en educación y en sanidad. Sri Lanka puso en marcha programas de alfabetización y de escolarización a comienzos ya de este siglo. Por los años cuarenta desarrolló en gran escala los servicios médicos, y en 1942 inició la distribución gratuita o subsidiada de arroz para reforzar la dieta de las masas desnutridas. En 1940 la tasa de mortalidad era allí del 20,6 por 1000; en los años sesenta había disminuido hasta el 8,6 por 1000.

Cambios similares tuvieron lugar en Kerala. A pesar de que su PNB es bastante inferior al promedio de la India, actualmente en Kerala hay una esperanza de vida de más de 70 años. Tal éxito, en condiciones

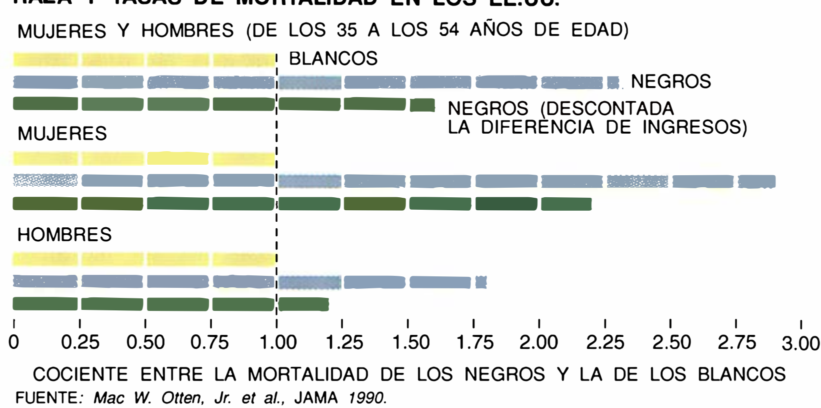


5. **En las naciones ricas no siempre es mayor la esperanza de vida que en las naciones pobres. Por ejemplo, la Arabia Saudí es rica pero tiene una esperanza de vida menor que la del estado de Kerala. Mediante planes públicos de educación, sanidad y nutrición, en Kerala ha aumentado la esperanza de vida, pese a ser muy inferior su PNB.**



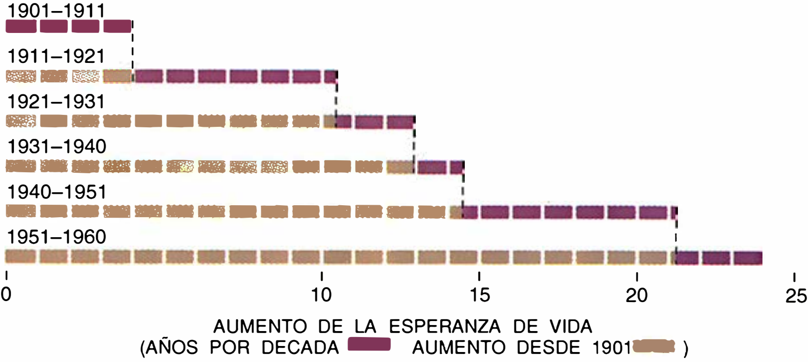


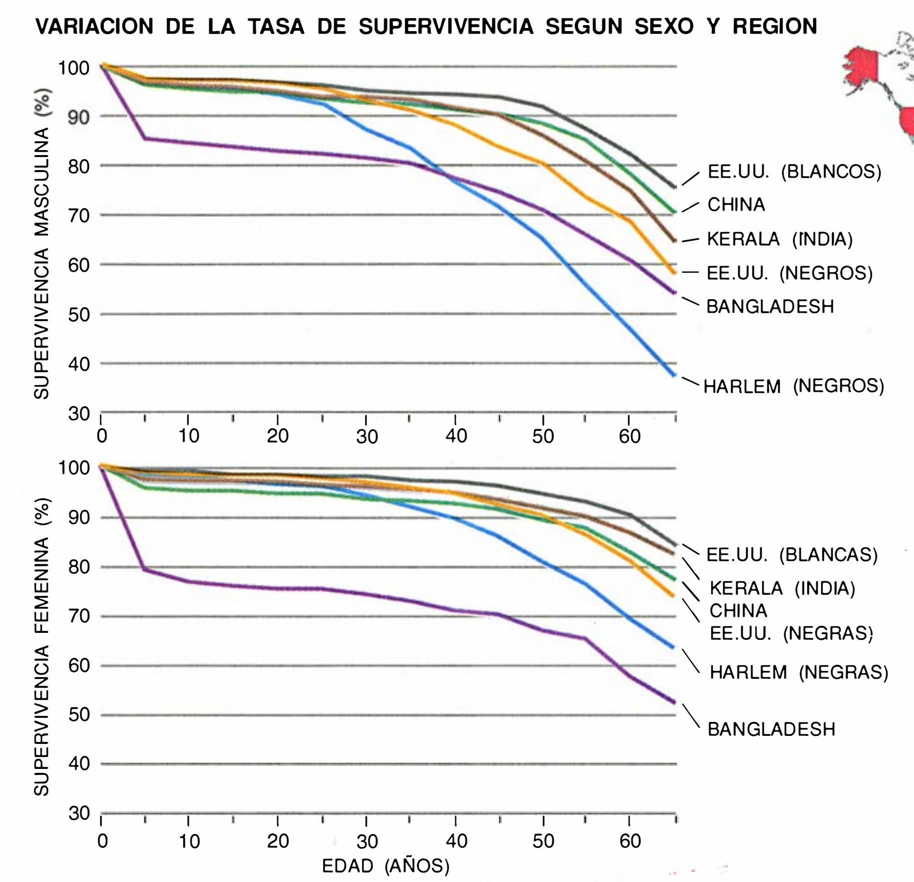
6. **En los EE.UU. las tasas de mortalidad varían según las razas. Los hombres negros entre los 35 y los 54 años tienen una probabilidad de morir 1,8 veces mayor que la de los blancos de esas edades. Y la probabilidad de que mueran las mujeres negras de ese grupo triplica la de las mujeres blancas coetáneas suyas.**





7. **En Inglaterra y en Gales la esperanza de vida aumentó mucho durante las dos guerras mundiales, gracias, en buena medida, a la generalización de la sanidad y al racionamiento, que garantizó la alimentación de todos.**





FUENTE: *Datos para Harlem y Bangladesh: Colin McCord y Harold Freeman,* NEJM *1990; para los demás lugares, estadísticas oficiales de la población desde los años ochenta. Los datos son los más recientes de que se dispone.*

8. La probabilidad de supervivencia del promedio de los afroamericanos es mayor que la de los afroamericanos que viven en Harlem, pero inferior a la de los estadounidenses blancos y a la de los habitantes de China y de Kerala, cuyas rentas son mucho menores. Aunque a las mujeres negras les va mejor que a los hombres de su raza, también quedan por detrás de las de China y las de Kerala a medida que aumentan sus edades.

de renta muy baja y de pobreza, es el resultado de la expansión educacional de la escuela pública, de la prevención epidemiológica social, de los servicios médicos personales y de la nutrición subsidiada.

Este análisis nada dice en contra de que el incremento del PNB contribuya mucho a aumentar la esperanza de vida. La solidez económica ayudará a una familia a conseguir mejor nutrición y más atenciones sanitarias. Por otro lado, el desarrollo económico concederá al gobierno mayores posibilidades de proveer a la educación, la sanidad y los abastecimientos. Pero los resultados del desarrollo económico no siempre se canalizan hacia tales programas. Muchas naciones —entre ellas, Arabia Saudí, Gabón, Brasil y Sudáfrica— tienen un palmarés en educación, sanidad y beneficencia muy inferior al de otros países (o regiones) que cuentan con un PNB alejado del precedente, pero han adoptado políticas que promueven el bien público: Sri Lanka, China, Costa Rica y Kerala, por citar algunas. El punto crucial está en que los países pobres no necesitan esperar a hacerse ricos para combatir la mortalidad y aumentar la esperanza de vida.

El cometido de la administración pública en el alargamiento de la esperanza de vida no es, por supuesto, algo exclusivo del Tercer Mundo. La intervención de los poderes públicos en la sanidad, en la educación y en la nutrición ha desempeñado históricamente un papel muy importante para el aumento de la longevidad en Occidente y en Japón. En Inglaterra y en el País de Gales, las décadas de la primera y la segunda guerras mundiales se caracterizaron por haberse dado durante ellas un aumento de la esperanza de vida mayor que durante cualquier otro decenio de este siglo. Los esfuerzos bélicos y el racionamiento llevaron a una más equitativa distribución de los alimentos y a que el gobierno prestase mayor atención a la sanidad. Pues bien, aquellas dos décadas tuvieron el menor de los crecimientos del PNB *per capita*: de hecho, entre 1911 y 1921, el crecimiento del PNB fue negativo. El esfuerzo público, y no la renta personal, fue la clave del aumento de esperanza de vida que se dio durante aquellos decenios.

El análisis de los datos de la mortalidad puede servir de ayuda para la evaluación económica de las estructuras sociales y de la gestión pública. Esta perspectiva puede servir para aclarar aspectos cruciales de la desigualdad social y de la pobreza, así como para definir políticas que las contrarresten. Uno de los problemas que hay que afrontar cuanto antes en los EE.UU. es el de la necesidad de comprender mejor la naturaleza de la penuria. La carencia de ingresos es, sin duda, uno de los rasgos característicos de la pobreza, pero la discusión sobre los pobres de Norteamérica en general y sobre los afroamericanos en particular pasa a menudo por alto aspectos nucleares del asunto, a causa de un exagerado atender a los ingresos.

Como con frecuencia se ha advertido, dos quintas partes de los habitantes del Harlem neoyorquino viven en familias cuyos niveles de renta están por debajo del umbral de la pobreza. Es un dato estremecedor; pero resulta que ese umbral, aun siendo muy bajo en el contexto de los EE.UU., es muchas veces la renta media de una familia, digamos, de Bangladesh, aun después de hacer las correcciones exigidas por las diferencias de precios y de valor adquisitivo. Desde algunos puntos de vista, las estadísticas de mortalidad nos instruyen mejor acerca de cómo comparar la pobreza en Harlem con la de Bangladesh. Ya Colin McCord y Harold Freeman, de la Universidad de Columbia y del hospital de Harlem, han hecho notar que los hombres de raza negra que viven en Harlem tienen menos probabilidad de llegar a los 65 años de edad que los que viven en Bangladesh. Según los datos, en torno a los 40 años de edad, los hombres de Harlem quedan por debajo de los de Bangladesh en cuanto a la tasa de supervivencia.

Estos parangones cobran mayor relieve cuando se estudian las situaciones de China y de Kerala, economías pobres que se han esforzado mucho más que Bangladesh en mejorar la salud y la educación. Aunque China y Kerala tienen tasas más altas de mortalidad infantil, las de supervivencia para los varones adolescentes y para los de más edad son, en ambos países, superiores a las de Harlem. Que la mortalidad de los varones sea en Harlem tan elevada se debe, en parte, a las muertes que causa la violencia, rasgo característico del cuadro de la miseria social en los EE.UU. Sin embargo, no es la violencia la única causa del elevado índice de mortalidad que se registra en ese distrito. En cuanto a la tasa de supervivencia, las mujeres de Harlem quedan por debajo de las de China y de las de Kerala a partir de las edades de los 35 y los 30 años, respectivamente.

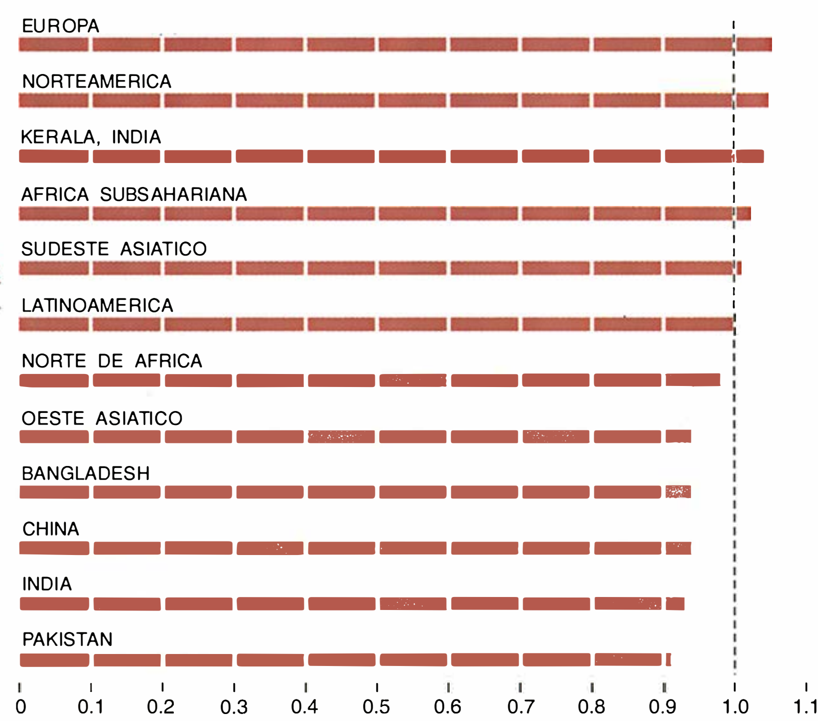
Por lo demás, un problema parecido afecta a los afroamericanos en general. Las tasas de mortalidad infantil entre la población negra de los EE.UU. son también inferiores a las de China y de Kerala, pero, según vamos subiendo por la escala de edades, los hombres y mujeres negros estadounidenses quedan por debajo de los hombres y mujeres de China y de Kerala en términos de porcentajes de supervivencia. La naturaleza y el alcance de la miseria entre los afroamericanos no se interpretan bien cuando se miden con el patrón de la renta. Según esta vara de medir, en comparación con los estadounidenses blancos los afroamericanos son pobres, pero inmensamente más ricos que los ciudadanos chinos y que los de Kerala. Por otra parte, en términos de vida y muerte, los estadounidenses afroamericanos tienen menos probabilidades de sobrevivir hasta una edad avanzada que las que tienen los habitantes de algunos de los países más pobres del Tercer Mundo.

Otro rasgo de desigualdad racial revelado por los datos de la mortalidad es la relativa privación en que se hallan las mujeres afroamericanas. En ciertos aspectos, las cosas les van a ellas peor que a los varones negros. Las diferencias entre la mortalidad de los blancos y la de los negros, para las edades comprendidas entre los 35 y los 54 años, resultan ser mucho mayores para las mujeres negras que para los hombres negros. Por descontado que las diferencias de mortalidad entre blancos y negros están relacionadas en parte con las diferencias entre sus rentas, pero aun después de descontar éstas, queda parte de aquéllas. Tratándose de las mujeres negras, la mayoría de las diferencias de mortalidad no pueden atribuirse en absoluto a las diferencias de rentas.

La información sobre la mortalidad puede utilizarse para investigar una manifestación elemental del prejuicio sexual. Un sorprendente rasgo demográfico del mundo moderno es la enorme variación geográfica en la proporción de mujeres y varones. Los datos médicos sugieren que, con una asistencia sanitaria similar, la mortalidad de las mujeres tiende a ser menor que la de los hombres. Hasta en el útero los fetos femeninos son menos propensos a malograrse. Aunque son concebidos y nacen más varones que hembras, sin embargo en Europa y en Norteamérica el número de mujeres es alrededor de un 5 por ciento mayor que el de hombres, porque también las tasas de supervivencia de ellas son más altas.

Pero en muchas partes del mundo que aún está en vías de desarrollo las proporciones entre mujeres y hombres son muy diferentes: mientras que en el Africa subsahariana esa proporción es de 1,02, en el norte de Africa es de 0,96; en China, Bangladesh y el occidente asiático, de 0,94; en la India de 0,93, y en Pakistán de 0,91. Para formarse una idea de las magnitudes implicadas conviene hacer preguntas de este tenor: Si en China y en países similares se diese la proporción entre mujeres y hombres que se da, digamos, en el Africa subsahariana, ¿cuántas mujeres más habría allí? Tomando como punto de referencia la proporción del Africa subsahariana, según hicimos Jean Drèze, de la Escuela de Economía de Delhi, y yo, es como si en los países en que hay déficit de mujeres hubiesen "desaparecido" más de 100 millones de ellas: sólo en China faltarían 44 millones y en la India 37 millones. Otros cálculos, con otros puntos de referencia, ponen la cifra entre los 60 y los 90 millones.

El fenómeno de la falta de mujeres refleja una mayor mortalidad histórica de las mujeres y una tenaz inclinación contra las mujeres en el uso de los medios sanitarios y ali-



9. Nacen más hombres que mujeres, pero éstas tienen tasas de mortalidad más bajas y superan en número a los hombres a igualdad de condiciones sanitarias. En Occidente la proporción de mujeres a hombres es de 1,05, cifra hinchada por las guerras. En otras partes las mujeres no han tenido el mismo acceso a la asistencia sanitaria que los hombres.

mentarios en esos países. Jocelyn Kynch, de la Universidad de Oxford, y yo examinamos los registros de los hospitales de Bombay, y vimos que, para que a las mujeres se las ingresara en ellos, tenían que estar más gravemente enfermas que los hombres. Otro estudio que hice con la colaboración de Sunil Sengupta, de la Universidad Visva-Bujarati, indicó que en dos poblaciones del oeste de Bengala la asistencia sanitaria y nutricional tendía sistemáticamente a favorecer a los muchachos.

Aunque tras estas tendencias laten factores históricos y culturales, también las instituciones económicas tienen su parte. Parece evidente que la capacidad de las mujeres para ganarse un sueldo y para colocarse, especialmente en puestos de trabajo más cualificados, fuera de casa, eleva su consideración social e influye, a su vez, en la atención que reciben dentro de la familia. El trabajar fuera de casa les abre también a las mujeres los ojos respecto al mundo y les da, a veces, más de una ocasión de cuestionar la justicia del orden socioeconómico imperante. La alfabetización, la educación, la posesión de tierras y la herencia pueden también mejorar en líneas generales la condición de la mujer.



10. LOS AFROAMERICANOS que viven en ambientes urbanos como el que vemos en esta fotografía tienen menos probabilidades de supervivencia que los ciudadanos de Kerala. Ello pone de manifiesto el fracaso de las políticas de EE.UU. en cuanto a ordenar la educación pública, la sanidad, la alimentación y la paz social.

En Kerala, la economía ha contribuido al progreso social de las mujeres. Allí el estado no sólo emplea a un alto porcentaje de mujeres en ocupaciones que imponen respeto, sino que, como dije antes, cuenta con un sistema de educación bien desarrollado, con elevados índices de alfabetización para ambos sexos, con una extensa red de servicios sanitarios y, para un importante e influyente sector de la población, con una tradición de herencia matrilineal. La proporción entre mujeres y hombres está en torno a 1,04 (aunque se reduciría un poco si se tuviera en cuenta a los hombres que trabajan fuera del estado). La esperanza de vida es en Kerala, al nacer, de 73,0 años para las mujeres y de 67,5 años para los hombres.

Esta esperanza media de vida es casi igual a la de China, pero a las mujeres les va mejor en Kerala. El gobierno chino se ha esforzado por erradicar la desigualdad socioeconómica entre los sexos, y China tiene una elevada tasa de empleo femenino. Pero el nivel de alfabetización de la mujer es muy inferior al alcanzado en Kerala. La alta mortalidad de niñas en China quizá tenga que ver también, en parte, con el efecto de las medidas obligatorias de control de nacimientos —la parcial imposición de la política de un hijo por pareja— en una sociedad en la que es abrumadora la preferencia por el varón.

Aunque este artículo no trata directamente ni de la fertilidad ni de la planificación familiar, quisiera advertir que el control obligatorio de los nacimientos entraña cierto peligro de inclinación por uno de los sexos. Hay, ante todo, muy buenos argumentos contra esa obligatoriedad, basados en consideraciones sobre la debida independencia y libertad de acción de las personas. Pero el posible efecto de tal medida sobre la mortalidad femenina viene a añadir otra dimensión al debate. El éxito chino en rebajar la tasa de nacimientos es citado con frecuencia en los debates sobre la necesidad de que se imponga en el Tercer Mundo la planificación familiar obligatoria. Cierto que la tasa de nacimientos china, 21 por 1000, es mucho más favorable que la de la India, 30 por 1000 (y que el promedio, 38 por 1000, que se da en los países de poca renta con la exclusión de China y la India). Sin embargo, la tasa de nacimientos de Kerala, 20 por 1000, está por debajo de la china sin necesidad de ninguna política de control obligatorio de los nacimientos y sin el problema de la mayor mortalidad de las niñas.

Abundan las pruebas demográficas de que los descensos de las tasas de nacimientos tienden a seguir a los de las tasas de defunciones. Esta pauta está en conexión con una exigencia decreciente de tener muchos hijos para asegurar la supervivencia. Y refleja también la interdependencia entre el control de nacimientos y el de muertes: hacer accesibles a la gente los métodos anticonceptivos puede combinarse de manera eficaz con la asistencia médica. En Kerala, en cuanto ha disminuido la tasa de muertes, ha bajado también la de nacimientos: del 44 por 1000, entre 1951 y 1961, al 20 por 1000 entre 1988 y 1990.

Las estadísticas de mortalidad calibran mejor la penuria económica que las magnitudes de renta y recursos financieros. La evaluación de la economía en términos de vida y muerte puede hacer que se preste atención a cuestiones apremiantes de la economía política. Este enfoque ayudará a que se comprendan mejor los problemas de las hambrunas, las necesidades sanitarias, la desigualdad entre los sexos, así como los de la pobreza y los de la discriminación racial incluso en las naciones ricas. La exigencia de ampliar las miras de la economía al uso para que en sus planteamientos quepa la economía de la vida y la muerte no es menos aguda en los EE.UU. que en el Africa subsahariana azotada por el hambre.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HUNGER AND PUBLIC ACTION. Jean Drèze y Amartya Sen. Oxford University Press, 1991.

INEQUALITY REEXAMINED. Amartya Sen. Harvard University Press, 1992.

Donde el núcleo limita con el manto

Esa zona de interacción, quizá la parte más dinámica del planeta, influye directamente en la rotación terrestre y en el campo geomagnético

Raymond Jeanloz y Thorne Lay

La estructura más viva de la Tierra se encuentra a unos 2900 kilómetros de profundidad, entre la zona inferior del manto y la parte superior del núcleo. Apenas atendida en las investigaciones del pasado, se nos muestra decisiva para conocer la evolución térmica y química del planeta. No podemos seguir considerándola mera zona de demarcación entre el núcleo superior de hierro fundido y el manto inferior de materiales rocosos; se trata, quizá, de la zona más activa, en términos geológicos, de todo el planeta. Sus características estructurales parecen haber cambiado drásticamente en el curso del tiempo, y sus propiedades físicas, puestas ahora de manifiesto, varían de un punto a otro en las inmediaciones de la zona basal del manto. Lo cierto es que los cambios físicos operados en la interfase entre el núcleo y el manto son aún más notables que los producidos en la superficie, donde la corteza limita con la atmósfera.

Se cree que la fuerte heterogeneidad de la región limítrofe entre núcleo y manto afecta a muchos procesos geológicos globales. La dinámica de la zona influye en el ligero balanceo del eje de rotación terrestre y en el campo geomagnético. Las variaciones que acontecen en esa región modulan, además, los movimientos de convección del manto, causantes de la deriva continental y de la tectónica de placas.

El primer indicio de que algo fuera de lo común ocurría en esa zona fronteriza se conoció a mediados de los años treinta, gracias a las vibraciones generadas por los terremotos. A través de casi todo el manto, la velocidad de las ondas sísmicas aumenta con la profundidad; las variaciones laterales de dicha velocidad son, además, muy pequeñas. Podemos atribuir tales características al fenómeno de "simplificación" que la Tierra manifiesta con la profundidad: la composición y la estructura del planeta se hacen más uniformes cuanto más ahondamos en su interior. En franco contraste, la gran diversidad de rocas y estructuras geológicas aflorantes muestran que la superficie es la región más compleja.

Pero la velocidad de las ondas sísmicas sigue el patrón indicado sólo hasta cierto punto. En los últimos cientos de kilómetros del manto, justo antes de que comience el núcleo, la velocidad media no aumenta de manera apreciable, y el cambio más importante de la misma se da entre una región y otra. El efecto de tales cambios es sutil: no supone más que un pequeño tanto por ciento de diferencia, si bien, desde un punto de vista geológico, esa minucia revela enormes variaciones de estructura, de temperatura o de ambas. Ya en una primera época se tuvo conciencia de su importancia con respecto al comportamiento relativamente simple que presentan las ondas sísmicas en la zona del manto inferior que está por encima de la región límite; por ello, le dieron a ésta, que se dedujo tenía un espesor de 200 a 400 kilómetros, una denominación propia: la capa D″.

La razón del nombre es histórica. Los primeros geólogos etiquetaron las partes internas del planeta con letras del abecedario, en vez de llamarlas corteza, manto y núcleo; y así, las capas intermedias que se fueron descubriendo se distinguirían añadiendo símbolos prima a las letras. Algunas cambiaron de nombre; D″ conservó, sin embargo, el suyo.

Los investigadores propusieron numerosas interpretaciones que dieran cuenta de las propiedades sísmicas de la capa D″. Desgraciadamente, había demasiadas explicaciones posibles y muy poca información para caracterizar de manera definitiva la capa. Hasta que no se produjeron ciertos avances técnicos en los años ochenta no fue posible mejorar la descripción de la zona. Mediante instrumentos registradores desplegados por todo el globo terráqueo, los sismólogos pudieron acumular y procesar datos suficientes para confeccionar imágenes tridimensionales del interior de la Tierra. Los sismógrafos utilizados operan entre 1 y 0,0003 hertzs —ciclos por segundo— más o menos. Se suele comparar la tomografía sísmica con los barridos tomográficos computarizados que se emplean en medicina, pero al estar basada en ondas sónicas se parece en realidad más a las ecografías de gestantes. La principal limitación del método estriba en su resolución: las estructuras menores de 2000 kilómetros tienden a difuminarse.

No obstante, la tomografía sísmica sirvió para cuantificar las propiedades de la capa D″. Mostró que difiere completamente del manto suprayacente. El hecho de que la velocidad de las ondas sísmicas sufra alteraciones en áreas de tamaño equiparable al de los continentes demuestra las gigantescas dimensiones de las estructuras que conforman la capa D″. Sin embargo, la tomografía sísmica no pudo explicar las causas de la variabilidad de las propiedades físicas. ¿Había grandes estructuras químicamente diferentes en el fondo del manto, tal y como los continentes señalan la heterogeneidad sísmica en la superficie? ¿O acaso aquellas heterogeneidades representaban meras diferencias de temperatura a gran escala en la base del manto?

Para responder a tales cuestiones,

RAYMOND JEANLOZ y THORNE LAY estudian los procesos físicos del interior de la Tierra. Jeanloz, profesor de geología y geofísica en la Universidad de California en Berkeley, es experto en la evolución interna de los planetas terrestres y en la creación de nuevos vidrios dotados de propiedades insólitas. Lay, especialista en sismología y geología estructural, enseña en la Universidad de California en Santa Cruz.

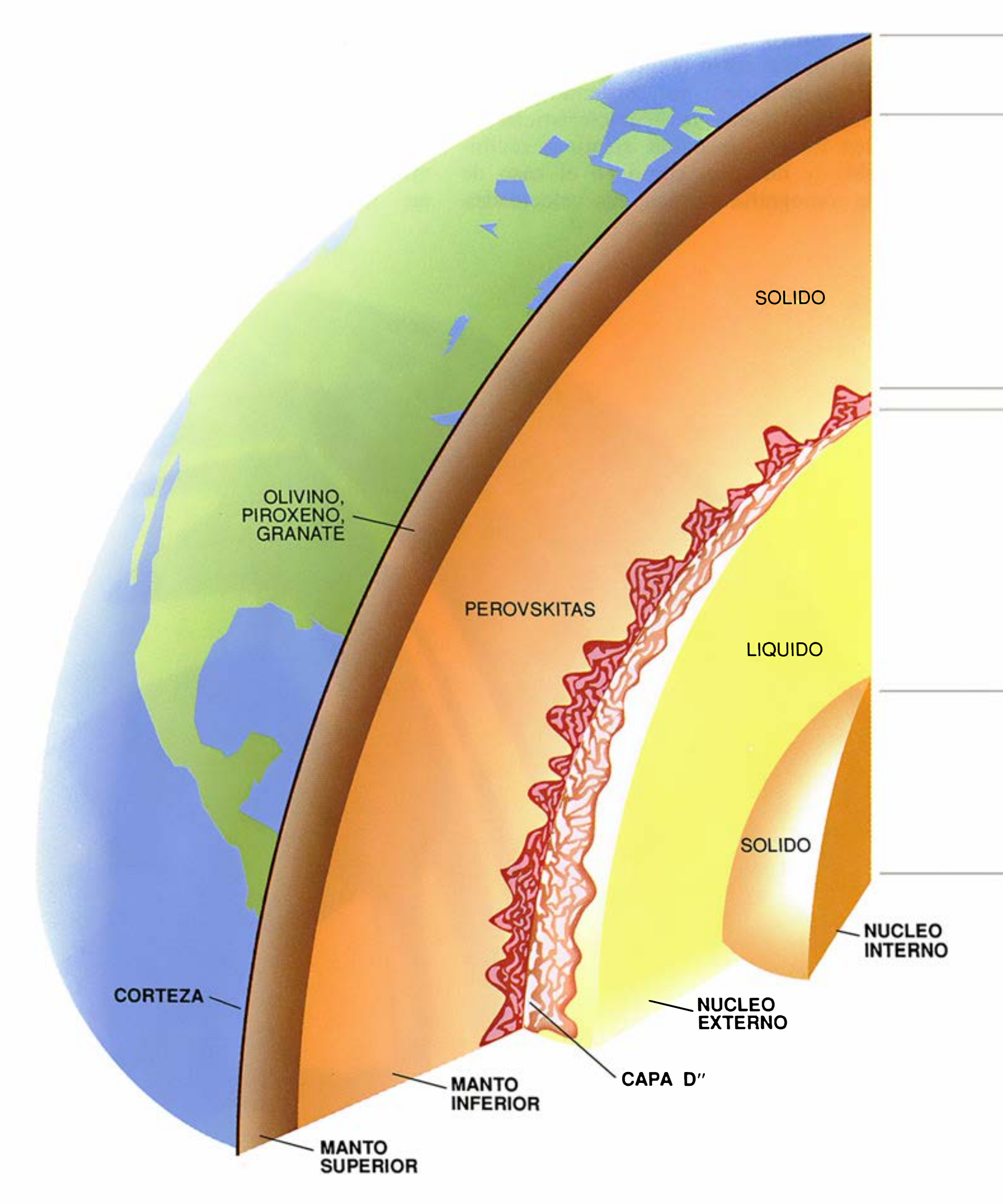
uno de nosotros (Lay) comenzó, a principios de los ochenta, a aplicar un nuevo método a la exploración del límite entre manto y núcleo: utilizar cálculos por ordenador para analizar todas las características de los frentes de ondas sísmicas recibidos, y no sólo, como en el caso de la tomografía sísmica, sus velocidades. Es muy grande el avance que propicia el análisis de las formas de onda: permite resolver estructuras de escasas decenas de kilómetros de sección; su limitación reside en que sólo pueden abordarse zonas muy restringidas de la transición entre el núcleo y el manto. No hay suficientes terremotos ni otras fuentes de energía sísmica como para obtener una imagen global con tanto detalle.

El estudio de las formas de onda sugiere que regiones vecinas en el seno de la capa D″ pueden diferir mucho más de lo que pudiera suponerse. En ese contexto, varios grupos que estudian el límite núcleo-manto bajo Siberia septentrional han encon-



1. LA VELOCIDAD DE LAS ONDAS SISMICAS varía en el interior de la Tierra, como se representa en esta figura generada mediante tomografía sísmica. En algunas zonas, la velocidad de las ondas supera la media para esa profundidad (*azul*); en otras, las ondas son más lentas (*amarillo*). Tales variaciones sugieren diferencias en la composición. Se nos escapa buena parte de la complejidad del límite entre manto y núcleo, porque las heterogeneidades son muy pequeñas para detectarlas.

trado que las velocidades acústicas cambian tan radicalmente en distancias muy pequeñas que sismómetros muy próximos registran formas de onda diferentes. La mejor explicación de este hallazgo es que la heterogeneidad de las velocidades sísmicas es de gran magnitud y ocurre en distancias tan pequeñas que no pueden resolverse, es decir, en unas decenas de kilómetros. El estudio de las formas de onda permite cartografiar las diferencias en espesor de la capa D″. En muchos lugares su techo produce un brusco aumento de la velocidad de las ondas, proceso que causa la reflexión de la energía sísmica. Las reflexiones han demostrado que el espesor de la capa D″ varía de forma drástica: desde una finura indetectable hasta una potencia de 300 kilómetros.



El grupo de Stanley M. Flatté ha confirmado la gran variabilidad de la capa D″. Desde mediados hasta finales de los ochenta, aplicaron nuevos métodos de análisis de ondas a las señales sísmicamente generadas procedentes del manto profundo. Su método se basa en una descripción estadística del modo en que las ondas se propagan a través de una sustancia que disperse fuertemente, a la manera de la niebla o las nubes. El método de Flatté consiste en observar cómo varía, al atravesar la capa D″, la forma del frente de ondas que un terremoto ocasiona. En principio, el terremoto envía un frente de ondas esférico. A medida que se refracta y dispersa por culpa de las variaciones de las propiedades sísmicas de los materiales que atraviesa —las fuertes heterogeneidades en el límite núcleo-manto, por ejemplo— el frente se riza o arruga.

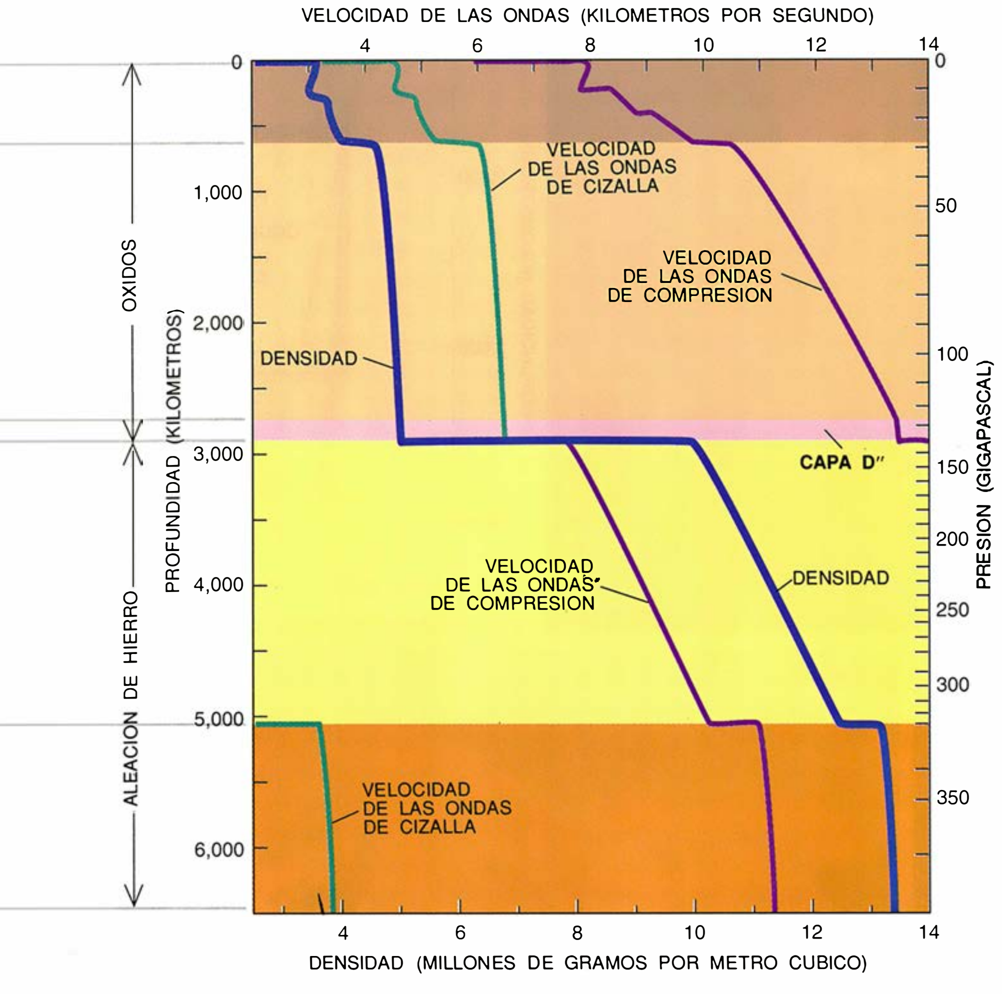
El grado de deformación del frente de ondas se mide mediante una densa red de sismómetros. Gracias a una red así instalada en Noruega, Flatté ha mostrado que la capa D″ es del todo opaca para las ondas sísmicas. Debe contener heterogeneidades no mayores de 10 kilómetros de longitud. Las observaciones sismológicas nos indican, pues, que la región D″ es una capa heterogénea que varía lateralmente de espesor.

En contraste con la opacidad de la capa D″, el límite entre núcleo y manto (sobre el que descansa la capa D″) se muestra de una manera clara y definida. El año pasado, John E. Vidale y Harley Benz demostraron fehacientemente que el cambio en la interfase es brusco. Para ello se valieron de gran número de estaciones sísmicas de registro desplegadas a lo largo del oeste de los Estados Unidos. Esta red de sismómetros observa por lo general la actividad sísmica de la zona, pero Vidale y Benz han hecho uso de ella para detectar las ondas sísmicas que rebotan en el límite entre el núcleo y el manto. Llama la atención que las ondas llegasen coherentemente a más de 900 estaciones de la red; tal coherencia indica una transición neta entre manto y núcleo, al menos para la zona estudiada. Esa brusca transición refleja hasta el 50 por ciento de las ondas sísmicas, transmitiendo el resto. El análisis de las ondas transmitidas y reflejadas enseña que la profundidad del límite no varía más allá de unos kilómetros.

El estudio de las ondas sísmicas ha contribuido mucho al esclarecimiento de la naturaleza de la capa D″ y del límite entre manto y núcleo. Pero la inaccesibilidad de esas regiones ha privado a los geofísicos de una completa comprensión de la génesis de estructuras tan complejas.

Si la investigación sismológica no puede llegar hasta las entrañas de nuestro planeta, ¿por qué no traer el núcleo y el manto hasta la superficie? Este es precisamente el camino que muchos han tomado, incluido Jeanloz, uno de los autores. En concreto, pensamos en simular las altas presiones y temperaturas existentes en el manto profundo y el núcleo. Un hito de la ingeniería lo hizo posible: la compresión de muestras minúsculas entre los vértices de dos diamantes, calentadas a continuación por medio de un potente rayo láser. En 1986 las prensas de diamantes producían ya presiones mayores que las que sufre el centro de la Tierra.

La dureza del diamante no es la única razón de su empleo como yunque.



2. SECCION DE LA TIERRA. Muestra las principales zonas del planeta (*en la página anterior*). La corteza y el manto están formados por cristales de óxidos, como olivino, piroxeno y granates en el manto superior, y silicatos perovskíticos en el manto inferior. El núcleo es una aleación férrica, líquida en la parte externa y sólida en la interna. Las capas coinciden con variaciones observadas en la densidad y en la velocidad de las ondas sísmicas a través de la Tierra (*arriba*). Densidad y velocidad de las ondas sísmicas aumentan en función de la profundidad, excepto en la capa D''. La energía sísmica puede propagarse tanto en forma de ondas de cizalla (ondas que oscilan en ángulos rectos respecto a la dirección de avance de su frente de ondas) como en forma de ondas de compresión (que se mueven adelante y atrás en la dirección de avance).

Su utilidad reside también en su transparencia. Puede enfocarse un rayo láser, que calentará la muestra a miles de grados centígrados, directamente a través del diamante. Además, puede observarse la muestra mientras se la somete a temperaturas y presiones altísimas. Midiendo la radiación térmica que la muestra emite a través del diamante, podemos determinar la temperatura de ésta; también los astrónomos calculan así la temperatura de las estrellas, por su color. Con la prensa de diamantes, calentadas las muestras por láser, pueden simularse las condiciones de presión y temperatura del límite núcleo-manto. Queríamos averiguar de qué manera reaccionan el material constituyente del núcleo externo y los minerales del manto inferior cuando entran en contacto.

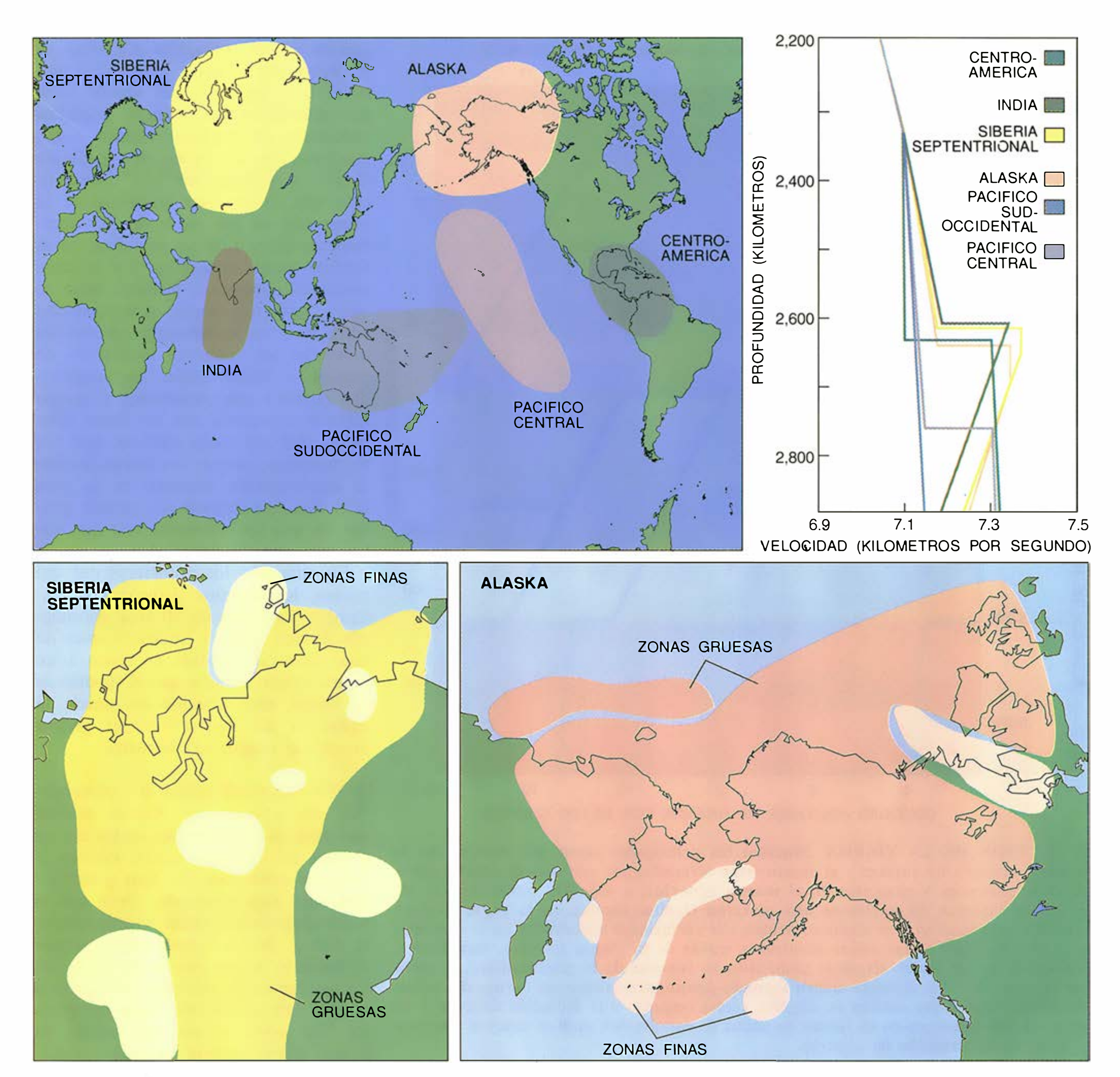
Por supuesto, sin saber qué materiales conforman el manto y el núcleo difícilmente podíamos comprimirlos. Elisse Knittle, que trabajaba con Jeanloz, se mantuvo en contacto con grupos de la Universidad Nacional de Australia, la Institución Carnegie de Washington y otros centros. Partíamos de trabajos experimentales previos, de modelos teóricos y un dato conocido: la presión en el manto inferior supera los 20 gigapascal (200.000 atmósferas).

De toda esa información dedujimos que en el manto inferior tenía que predominar una fase mineral de alta presión, una forma densa de silicato ferromagnésico, $(Mg,Fe)SiO_3$, compuesto químico resistente que puede formarse solamente a presiones por encima de los 20 gigapascal. Porque presenta la misma estructura cristalográfica que la perovskita ($CaTiO_3$), se le denomina silicato magnésico perovskítico. La roca del manto inferior probablemente contiene pequeñas cantidades de magnesio-wüstita —una combinación de óxido de magnesio (MgO) y wüstita (FeO)—. Composición que difiere por completo de la observada en las rocas de la superficie terrestre o de su vecindad; estas últimas están integradas por muchos minerales complejos, distintos unos de otros, que reaccionan químicamente entre sí y se transforman en nuevos minerales bajo cambios moderados de presión y temperatura. La simplicidad química que caracteriza al manto inferior concuerda con los datos obtenidos mediante ondas sísmicas, que nos lo muestran carente en buena medida de estructuración (excepto en la capa D''). Esta concordancia nos permite confiar en que los minerales con que trabajamos son los apropiados.

En cuanto a los constituyentes del núcleo, los estudios sismológicos realizados hace más de 50 años permitieron deducir que el núcleo consta de una sustancia fundida en torno a un centro sólido. Se sabe que el fundido es un metal, una aleación de hierro; la agitación del hierro fundido genera el campo magnético terrestre.

Una vez establecidos los compuestos a examinar, Knittle realizó una serie de experimentos en los que se ponían en contacto hierro líquido y silicatos cristalinos de tipo perovskítico bajo altas presiones. Halló que la perovskita reaccionaba vigorosamente con el hierro líquido, aun cuando el contacto durase sólo unos segundos. La naturaleza de esta reacción química resultó tan interesante cuan inesperada. Sus productos son una mezcla de óxidos eléctricamente aislantes —silicato magnésico y stishovita (SiO_2)— y aleaciones metálicas —ferrosiliciuro ($FeSi$) y wüstita—. No se sabía que la wüstita formase aleaciones metálicas en condiciones algunas de presión y temperatura. Cualitativamente hablando, la wüstita puede reaccionar así debido a que, sometida a altas presiones, su átomo de oxígeno adopta el comportamiento químico propio de su vecino en la tabla periódica, el azufre. Los sulfuros metálicos, el disulfuro de hierro por ejemplo (la pirita) son, por supuesto, archiconocidos.

Los experimentos mostraron, además, que el hierro líquido comienza a reaccionar con las sustancias del manto a presiones de entre 20 y 30 gigapascal. Tales presiones distan mucho de las que se dan en el límite entre manto y núcleo (que son del orden de 136 gigapascal). Las reac-



3. LA VELOCIDAD DE LAS ONDAS DE CIZALLA en la capa D″ cambia a través de la Tierra, como se indica en las seis regiones (*áreas coloreadas, arriba a la izquierda*) estudiadas. La distribución de velocidades en función de la profundidad (*arriba a la derecha*) muestra que cada región exhibe una discontinuidad propia en la capa D″; ello demuestra que la capa D″ varía a lo largo del mundo. Los mapas ampliados (*abajo*) para zonas bajo Siberia y Alaska resumen la heterogeneidad de la capa D″, mostrando el entremezclarse de zonas gruesas (*oscuro*) con áreas tan finas que llegan a ser sísmicamente invisibles (*claro*).

ciones deben, pues haber persistido desde los albores del planeta, cuando la Tierra se formaba y el núcleo se constituía a presiones inferiores a los 136 gigapascal, y han debido de afectar no poco al sistema manto-núcleo. A lo largo de la historia geológica es probable que el metal del núcleo haya absorbido una cantidad notable de oxígeno, o se haya combinado con él. En esencia: la roca del manto inferior ha estado, y sigue, disolviéndose lentamente en el metal líquido del núcleo externo. Berni J. Alder propuso esta hipótesis hace más de 25 años. Nuestros experimentos confirman su conjetura.

La hipótesis de Alder ofrece una explicación sencilla de que las propiedades del núcleo sean parecidas, aunque no del todo iguales, a las del hierro a temperaturas y presiones similares. La densidad del núcleo externo es más o menos un 10 por ciento menor que la del hierro puro. Pero como indicaban la hipótesis de Alder y nuestros propios experimentos con la prensa de diamante, el núcleo no puede estar constituido exclusivamente por hierro. Un núcleo de hierro puro habría sido atacado por reacciones químicas con la roca suprayacente en el curso de los tiempos geológicos. Probablemente, el núcleo nunca fue de hierro puro; tendría en un principio níquel, azufre y otros elementos menos abundantes. Los meteoritos ricos en hierro, restos parciales de los materiales con que se formó la Tierra, justifican esta creencia. Tienen impurezas muy similares a las del núcleo. Como el hierro puro, estas aleaciones ricas en hierro pueden reaccionar químicamente con compuestos rocosos a al-

tas temperaturas y presiones, formando una aleación con el oxígeno.

Según nuestros experimentos, el líquido denso del núcleo externo debe infiltrarse en la roca, seguramente por capilaridad. El metal fundido penetraría por los intersticios entre los granos minerales del fondo del manto. Del cálculo de las fuerzas capilares que intervienen se desprende que el líquido del núcleo podría ascender de unas decenas a unos pocos centenares de metros sobre el límite entre núcleo y manto. La reacción entre el núcleo líquido y el manto rocoso probablemente acontece en menos de un millón de años, un instante a escala geológica.

El líquido, sin embargo, no ha de ascender y moverse siempre en contra de la gravedad. No es probable que la interfase entre manto y núcleo sea del todo lisa. El líquido metálico podría percolar lateralmente y hacia abajo en las rocas del manto desde las regiones donde el límite entre núcleo y manto se encuentre en una posición más elevada. Mediciones sísmicas y geodésicas sugieren que la topografía del límite se aparta de la lisura absoluta, y que la desviación está entre unos cientos de metros y unos pocos kilómetros. Por tanto, la zona de permeabilidad y reacción química directa entre el núcleo líquido y el manto rocoso tiene un espesor que sólo oscila entre unos cientos y unos pocos miles de metros. Este tamaño explica por qué el estudio de las ondas sísmicas no detecta signos de reacciones en el límite entre el manto y el núcleo: el espesor de la zona de reacción es menor que las longitudes de onda sísmicas. Además, sólo una pequeña fracción de la zona de reacción se presenta en estado líquido en un momento dado. La presencia de una pequeña cantidad de líquido no alterará apreciablemente la velocidad de las ondas sísmicas en el manto profundo.

¿De qué manera explican estas reacciones químicas, desarrolladas en el límite entre núcleo y manto, las características observadas de la capa D″?

La respuesta se halla en un proceso complejo e indirecto, resultante de la actuación de las fuerzas presentes en la interfase núcleo-manto. Tales fuerzas derivan de la energía térmica del núcleo infrayacente, que calienta la roca de la base del manto. Como consecuencia, las partes del manto recalentadas ascienden en un período de entre unas decenas y unos centenares de millones de años —mucho más largo que el tiempo de reacción entre manto y núcleo, que dura menos de un millón de años—. La convección rompe el área de reacción en el límite manto-núcleo: desplaza los materiales hacia arriba y expone roca fresca al corrosivo líquido procedente del núcleo. La convección es la misma fuerza que causa el movimiento de las placas tectónicas de la superficie.

La convección del manto no desplaza los líquidos muy lejos; cualquier metal líquido que pudiera haber en el límite se difundiría por las rocas porosas, como si de esponjas se tratara, antes de ascender. Por otro lado, los productos cristalinos ricos en hierro procedentes de la zona de reacción, como la wüstita, están ya incorporados al flujo del manto. La lenta convección de éste eleva esos compuestos a una altura no muy grande antes de que la densidad de los sólidos metálicos inste su hundimiento. El comportamiento de estos sólidos recuerda el de los posos de especias en el fondo de una jarra de ponche.

En consecuencia, las sustancias ricas en aleaciones tenderían a apilarse en el fondo del manto, especialmente en las regiones cercanas al flujo ascendente. La dispersión ascendente fomenta la infiltración de material procedente del núcleo y crea una zona potente de mezcla. La intrusión de los productos de reacción y el manto inalterado por las reacciones causa la heterogeneidad sísmica. En contraste, las zonas de flujo descendente dispersarían los posos, y así tenderían a menguar la capa D″ y a deprimir el límite entre manto y núcleo. Los modelos de Louise Kellogg y Norman H. Sleep, entre otros, indican que las aleaciones metálicas en puntos determinados de las zonas de reacción podrían ascender varios cientos de kilómetros en el seno del manto. El proceso requeriría decenas de millones de años.

La formación de apilamientos ricos en aleaciones en el fondo del manto resuelve un importante misterio: la variabilidad del grosor de la capa D″. Es más, los cálculos indican que la altura de las acumulaciones de aleación introducidas en el manto es comparable al espesor de las zonas más gruesas de la capa D″. Considerando los miles de millones de años durante los cuales se han venido acumulando esos posos metálicos, es verosímil que la complejidad y las variaciones de espesor de la capa D″ se deban en buena parte al modo en el que el flujo del manto controla la capa de reacción rica en aleaciones. El

4. EN LA DISTORSION DE LAS ONDAS SISMICAS se apoyan los investigadores para analizar las características heterogéneas de la capa D″. Las ondas procedentes de un terremoto son lisas. Cuando atraviesan la región D″ sus frentes de onda se rizan o arrugan.

flujo podría además haber capturado en su movimiento otros materiales densos del manto o productos procedentes del núcleo. Sospechamos que podría acumular, aunque en menor cuantía, posos de reacción en la cara interior del límite entre manto y núcleo. Es probable que en el seno del núcleo externo líquido haya una capa análoga a la D'' pero más delgada.

Teniendo en cuenta la intensa dinámica que se desarrolla a 2900 kilómetros de profundidad, no sería sorprendente que las fuerzas del sistema manto-núcleo se dejaran sentir en el planeta entero. De hecho, hay indicios —que casi son pruebas— de que la zona manto-núcleo influye en dos fenómenos observables en la superficie: el balanceo del eje de giro de la Tierra —la nutación— y el campo geomagnético.

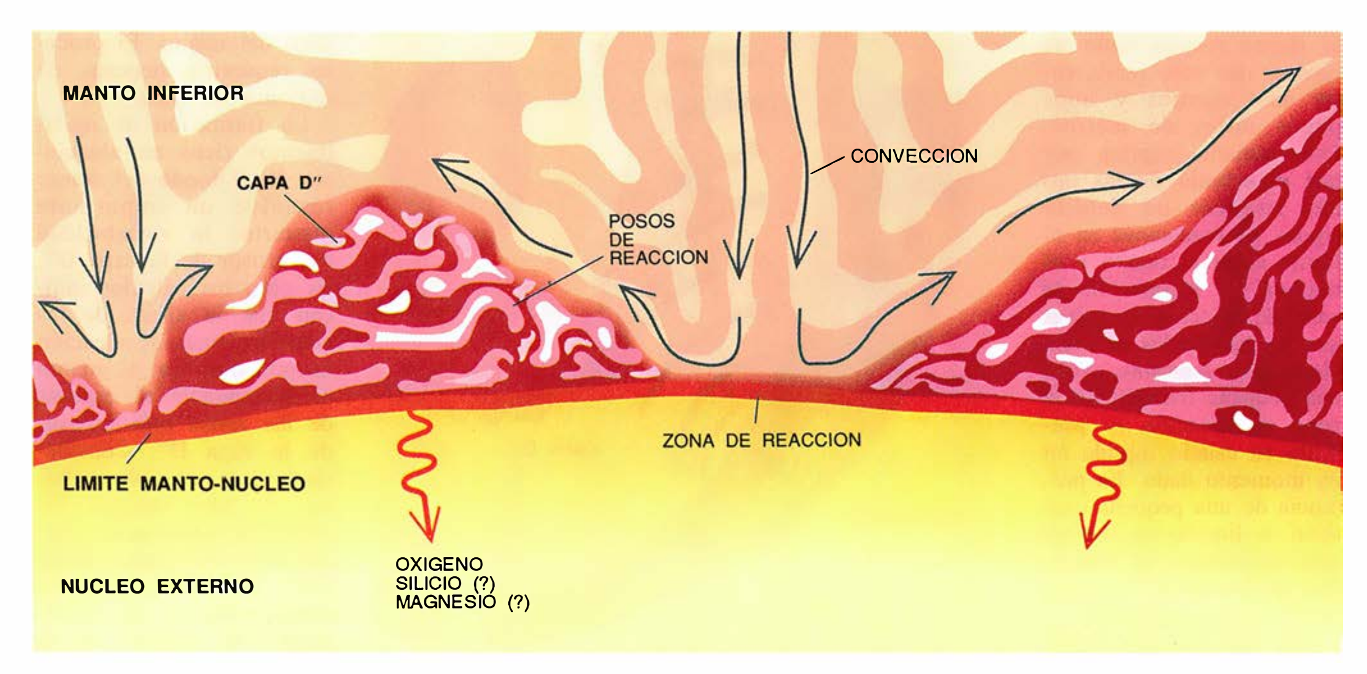
Bruce A. Buffett, con Irwin I. Shapiro, de Harvard, llegó, tras efectuar cálculos muy precisos del balanceo, a la conclusión de que el límite entre el núcleo y el manto afecta a la nutación del eje terrestre. Se mide el balanceo mediante la interferometría de muy larga línea de base. Se atribuían los movimientos de nutación terrestre a varias fuerzas de marea —la fricción debida al rozamiento de la superficie sólida de la Tierra con la atmósfera y los océanos, las interacciones gravitacionales con el Sol y la Luna—. Buffet descubrió, sin embargo, una componente de la nutación que las fuerzas de marea no explican. Movido por los resultados de la prensa de diamantes, consideró la posibilidad de que una delgada zona de reacción en el límite manto-núcleo diera cuenta de esa componente anómala.

Y obtuvo que así era, pero sólo si la capa de reacción contenía, como se infería de los experimentos, materiales eléctricamente conductores. Las líneas de campo magnético que emanan del núcleo inducirían pequeñas corrientes eléctricas que circularían en la mezcla de materiales conductores y producirían, a su vez, sus propios campos magnéticos; éstos interactuarían con el campo geomagnético principal, del mismo modo que los polos de un imán atraen o repelen. Fundamentalmente, núcleo y manto se comportarían a guisa de dos imanes que actuasen el uno sobre el otro, y ese acoplamiento afectaría a las nutaciones. Los datos de interferometría se explican perfectamente aceptando una zona heterogénea de reacción de cientos de metros de espesor que contenga metal.

Nuestros experimentos predijeron que la zona de reacción ha de tener esa configuración. Se supone que los productos de reacción del fondo del manto consisten, en unas decenas de tanto por ciento, en aleaciones conductoras de la electricidad tales como siliciuro de hierro y wüstita. Una zona que contuviera sólo entre un 15 y un 20 por ciento de aleación explicaría ya la nutación. Por tanto, nuestra conclusión de que la zona de reacción tiene unos cientos de metros de espesor y fluctúa en grosor y conductividad a lo largo del límite núcleo-manto concuerda con las hipótesis de Buffett.

El segundo efecto observable en superficie en el que influye la región núcleo-manto es el campo geomagnético. Se conoce bastante bien el origen del campo geomagnético principal. Su causa es un efecto de dinamo, no el magnetismo corriente del hierro del núcleo (el hierro pierde sus propiedades magnéticas a las temperaturas y presiones que existen en el núcleo). La agitación del metal líquido del núcleo externo actúa esencialmente como una corriente eléctrica que se mueve por un cable: como ésta, el núcleo genera un campo magnético a su alrededor.

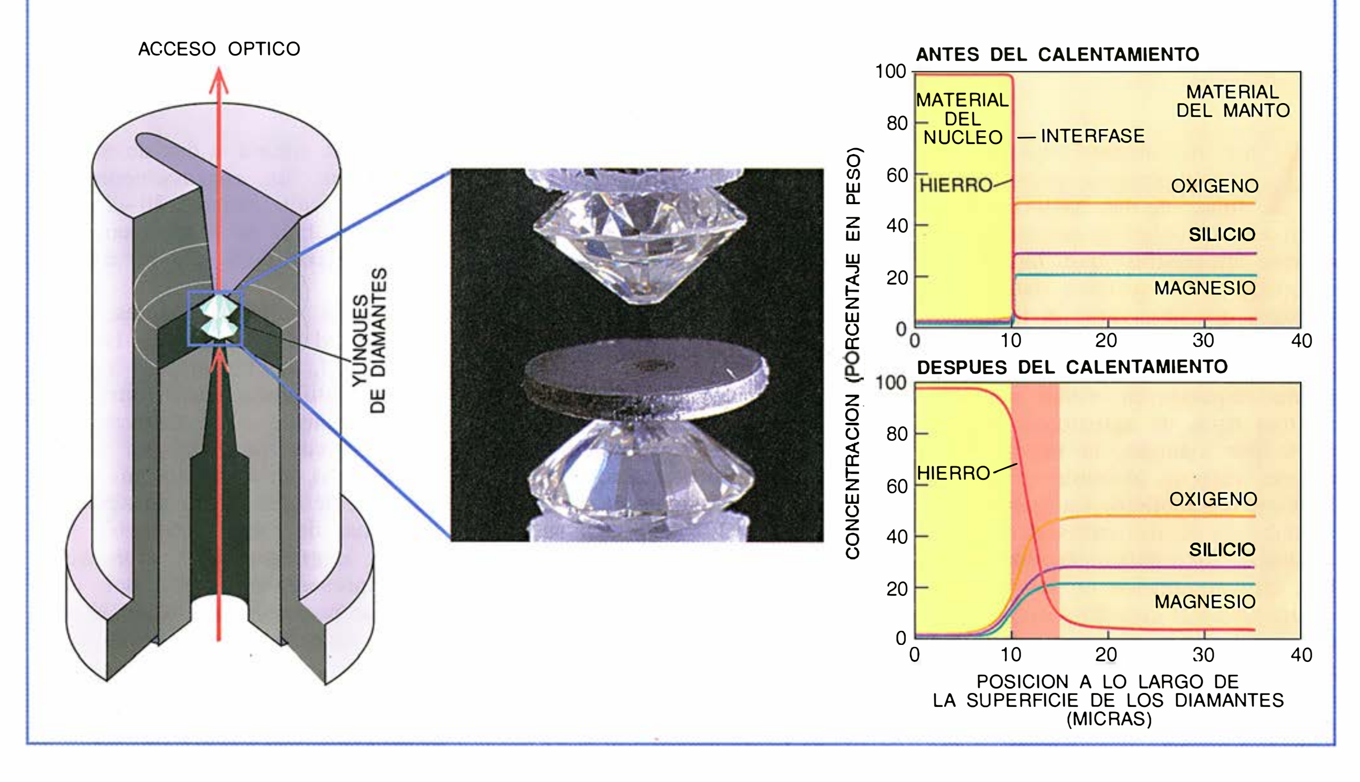
La convección impulsa el movimiento del núcleo externo fundido. El líquido caliente procedente del interior se eleva hacia la parte más fría del núcleo superior. El movimiento transfiere el calor hacia arriba y propicia un flujo convectivo. El líquido más frío de las zonas cercanas al límite núcleo-manto se hunde, y contribuye también, por tanto, a impulsar la convección. Es posible que haya otras fuentes de convección, como la segregación interna de sólidos y líquidos en el núcleo externo. De esta manera, la energía mecánica de convección —el movimiento del fluido en el núcleo externo— se convierte en energía magnética.



5. FORMAS QUE LA CAPA D'' ADQUIERE como resultado de las reacciones químicas entre manto y núcleo. En esencia, la roca del manto se disuelve parcialmente en el hierro líquido del núcleo externo, produciéndose unos "posos" ricos en metales que se depositan en el límite entre manto y núcleo. La convección del manto tiende a dispersar los productos bajo las regiones de flujo descendente y a acumularlos en las regiones de flujo ascendente. Puede que haya una fina capa enriquecida en oxígeno y, quizás, en silicio y magnesio en la parte interior de la interfase núcleo-manto.

El yunque de diamante

El dispositivo (*izquierda*) reproduce las presiones y temperaturas existentes en el interior del planeta. El material que se va a comprimir y calentar se coloca en una arandela de metal, entre las puntas de dos yunques de diamante (*foto*). El giro de un tornillo acerca las puntas, con lo que se comprime la muestra. Puede enfocarse un rayo láser a través de los diamantes para calentar la muestra. Los perfiles de composición (*derecha*) muestran la concentración de hierro, silicio, oxígeno y magnesio (elementos presentes en el límite manto-núcleo) antes y después del calentamiento. Se han representado las cantidades con respecto a las posiciones de los elementos en la superficie de uno de los diamantes. Tras el calentamiento, la zona de interfase se ensancha, alcanzando de 10 a 15 micras. Esta expansión indica que los elementos han reaccionado. La reacción genera una mezcla de aleaciones metálicas (FeSi y FeO) y óxidos aislantes ($MgSiO_3$ y SiO_2)



Los principios que gobiernan estos procesos son los de la magnetohidrodinámica —una combinación de hidrodinámica, o física de fluidos, y electromagnetismo—. Pero las ecuaciones matemáticas que los expresan son tan complicadas que nadie ha podido resolverlas completamente. Por eso, las soluciones obtenidas han de basarse en supuestos físicamente aceptables, muy simplificados; no abarcan, pues, detalles pequeños, aunque observables, del campo geomagnético, por ejemplo las ligeras oscilaciones de su intensidad. Quizá la discrepancia se deba a una de las simplificaciones tradicionales que se usan en los cálculos: que el núcleo metálico está rodeado por una región eléctricamente aislante, correspondiente al manto. Se cree ahora que el manto interno no es del todo aislante, sino que está constituido por una mezcla heterogénea de aleaciones metálicas y silicatos aislantes.

Friedrich H. Busse reexaminó las ecuaciones magnetohidrodinámicas y descubrió una clase nueva de soluciones matemáticas del problema de la dinamo, que resultan directamente de las variaciones de la conductividad eléctrica del manto inferior y dependen de dos factores principales. El primero es que las líneas del campo geomagnético se "congelan" prácticamente en el metal líquido del núcleo externo. Así, enclavadas en éste, las líneas se mueven sólo con el flujo convectivo del núcleo externo líquido. El segundo, que las regiones metálicas inmersas en la capa D″ interfieren en el movimiento horizontal de las líneas de campo que dimanan del núcleo. La capa D″ puede desviar o acumular las líneas del campo geomagnético. Ambos factores, de acuerdo con los cálculos de Busse, crean campos locales en el fondo del manto, que podrían explicar las oscilaciones de intensidad y otros rasgos complejos del campo geomagnético.

Las características electromagnéticas del límite núcleo-manto podrían afectar también a las inversiones del campo magnético terrestre. Durante las inversiones, que ocurren cada 100.000 años, los polos magnéticos parecen seguir una trayectoria preferente. Se han postulado varios mecanismos por los que las variaciones eléctricas de la capa D″ podrían influir en el camino de los polos magnéticos.

La dinámica entre núcleo y manto se extiende más allá del planeta en sí, proyectándose en el espacio por medio del campo geomagnético. Conocemos ahora, pues, la importancia planetaria de la interfase núcleo-manto. Una tecnología más desarrollada nos ayudará a esclarecer cómo esta remota región configura la evolución de la Tierra.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE NATURE OF THE EARTH'S CORE. R. Jeanloz en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 18, páginas 357-386; 1990

EARTH'S CORE-MANTLE BOUNDARY: RESULTS OF EXPERIMENTS AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES. E. Knittle y R. Jeanloz en *Science*, vol. 251, páginas 1438-1443; 22 de marzo de 1991.

Respuesta de las células al estrés

En situaciones de emergencia, las células producen proteínas para reparar los daños. El conocimiento de los mecanismos implicados en esa respuesta podría utilizarse para combatir las infecciones y las enfermedades de autoinmunidad

William J. Welch

Ante un aumento repentino de la temperatura, todas las células, de las bacterias a las neuronas, redoblan la producción de ciertas moléculas que habrán de amortiguar los posibles daños. Los biólogos que observaron el fenómeno, hace 30 años, lo llamaron "respuesta al choque térmico". Viose luego la misma respuesta en células sometidas a otros tipos de agresiones ambientales; por ejemplo, la exposición a metales tóxicos, alcoholes y muchos venenos metabólicos. La respuesta se produce en células cultivadas, en los tejidos de los niños aquejados de fiebre, en los órganos de las víctimas de un ataque al corazón y en pacientes cancerosos en régimen de quimioterapia. Como son muchos los estímulos diferentes que instan el mismo mecanismo de defensa celular, se ha convenido en darle el nombre de respuesta al estrés; y proteínas contra el estrés serán, obviamente, las moléculas que participan.

De las investigaciones sobre la estructura y función de las proteínas anti-estrés, se desprende que son algo más que meras moléculas de defensa. Durante la vida de una célula, muchas proteínas de ésas intervienen en procesos metabólicos esenciales, incluidos la síntesis y ensamblaje de otras proteínas celulares. Algunas proteínas anti-estrés parecen dirigir las actividades de moléculas que regulan el crecimiento y diferenciación celular.

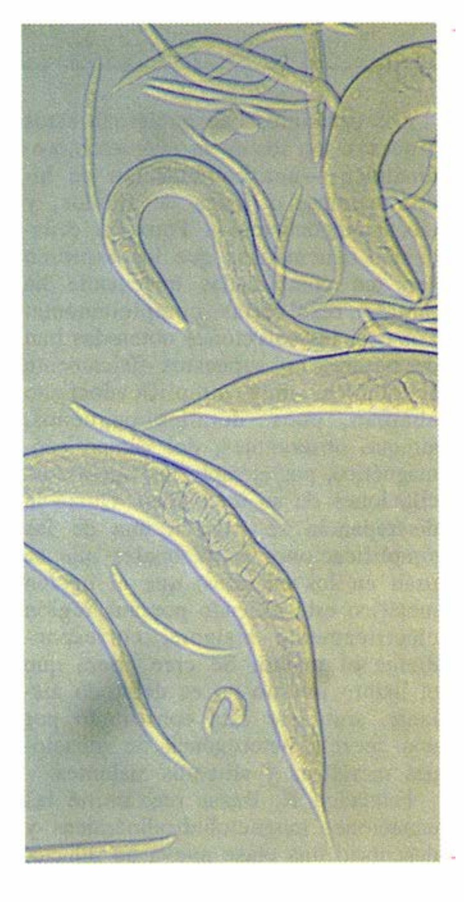
Queda mucho por andar en el conocimiento de las proteínas anti-estrés, lo que no significa que no sepamos nada del proceso de respuesta y sus posibles aplicaciones. Podría utilizarse en ensayos toxicológicos y en medición de la contaminación; aunque más lejana su aplicación, podría incorporársela en la lucha contra infecciones, cánceres y enfermedades inmunológicas.

WILLIAM J. WELCH lleva más de diez años estudiando la caracterización de la respuesta celular a la tensión e investigando su papel en las enfermedades humanas. Pertenece al claustro docente de la Universidad de California en San Francisco.

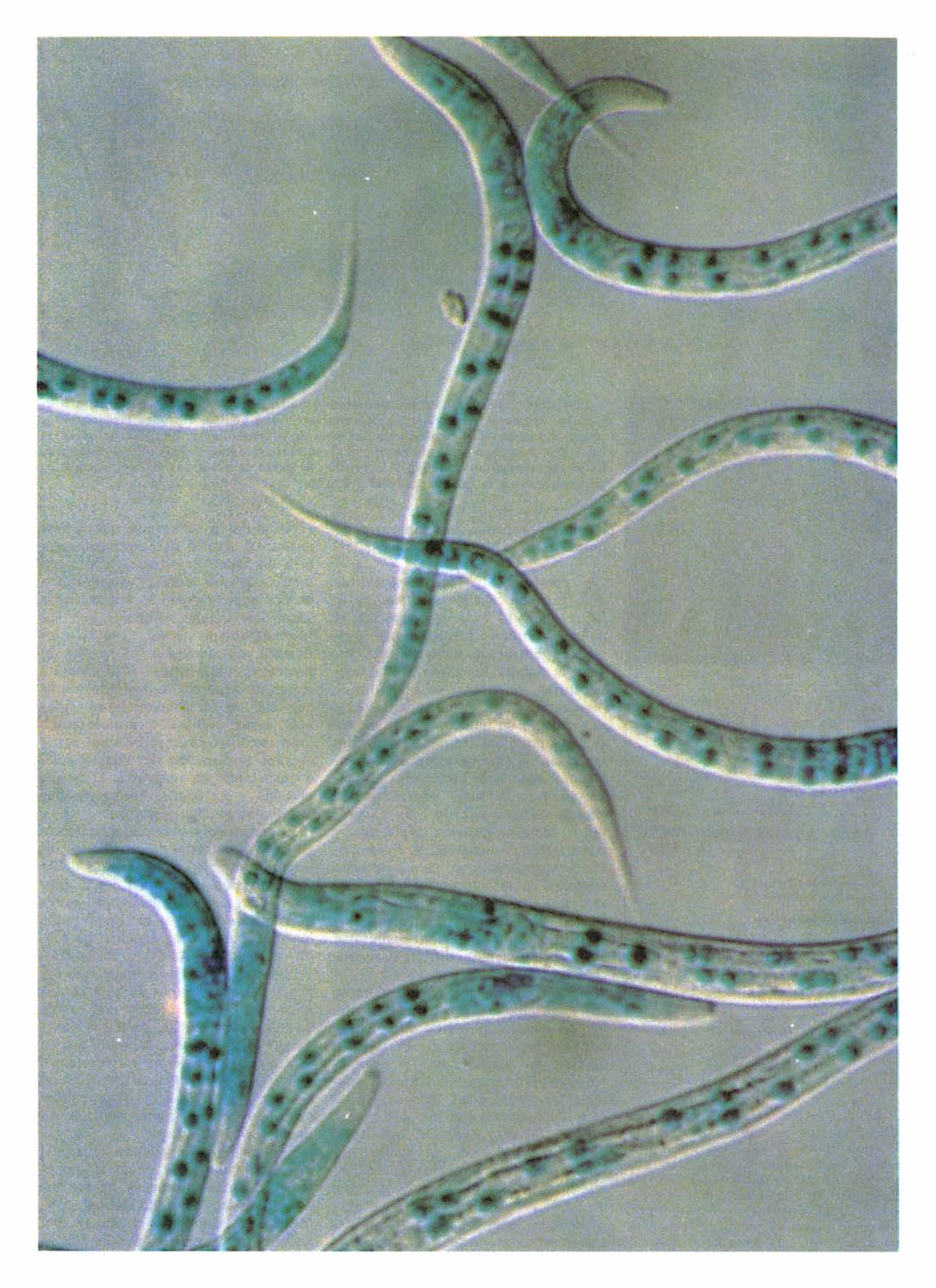
No imaginaban tanto quienes descubrieron la respuesta al estrés, un hallazgo por otra parte casual. A principios de los sesenta, los biólogos que estudiaban las bases genéticas de desarrollo centraban su atención en la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster*. *Drosophila* es un organismo idóneo para conocer los procesos que conducen del embrión al adulto; en efecto, sus glándulas salivares portan cuatro cromosomas, donde la cantidad normal de ADN se ha duplicado miles de veces y todas las copias permanecen, además, alineadas unas junto a otras. Estos cromosomas politénicos, muy grandes, se ven con el microscopio óptico. Durante las etapas del desarrollo, van adquiriendo mayor grosor distintas regiones cromosómicas; cada engrosamiento es el resultado de un cambio específico en el patrón de expresión génica.

F. M. Ritossa, del Laboratorio de Genética y Física de Nápoles, observó en esos años un patrón nuevo de engrosamientos tras la exposición de las glándulas salivales a temperaturas ligeramente superiores a las óptimas para el normal desarrollo de las moscas. El patrón de engrosamientos aparecía al minuto o dos de subir la temperatura; los engrosamientos seguían creciendo durante 30-40 minutos. Los trabajo de Ritossa encontraron continuidad en la década siguiente.

En 1974, Alfred Tissières, de la Universidad de Ginebra, y Herschel K. Mitchell, del Instituto de Tecnología de California, demostraron que, simultáneamente a los engrosamientos cromosómicos inducidos por el choque térmico, se detectaba una expresión alta de cierta serie particular de "proteínas de choque térmico". Esos nuevos engrosamientos cromosómicos representaban sitios del ADN donde se producían nuevos ARN mensajeros específicos, que llevan la in-



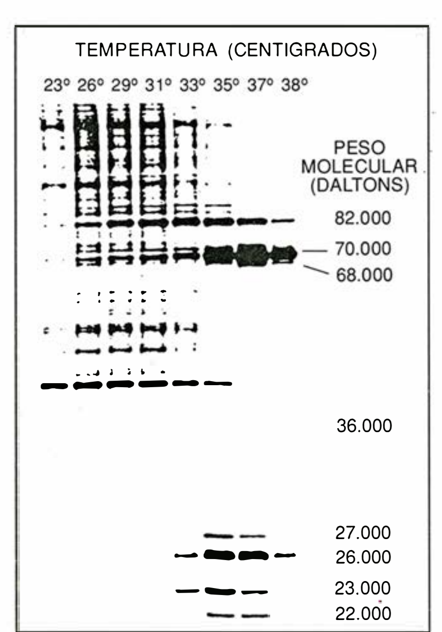
1. GUSANOS modificados geneticamente, de color claro (*derecha*), se tornan azules (*página siguiente*) en presencia de toxinas, excesivo calor u otra agresión ambiental. El color se debe a la actividad de un gen chivato cuya expresión está gobernada por secuencias que regulan la expresión de genes para proteínas anti-estrés, utilizadas por los organismos para enfrentarse a esas agresiones.







2. ENGROSAMIENTOS en los cromosomas politénicos de la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster* (*izquierda*). Revelan actividad génica. Durante las diferentes etapas del desarrollo, cambian los patrones de engrosamiento. Las altas temperaturas inducen la formación de ciertos engrosamientos, como el indicado en la figura. Estos engrosamientos reflejan la expresión de genes de proteínas de choque térmico pertenecientes a la familia molecular hsp70.



3. ACUMULACION de proteínas de choque térmico en las células, inducida por la temperatura. En estos geles electroforéticos, cada banda horizontal es una proteína de *Drosophila*. Cuando aumenta la temperatura, las células dejan de sintetizar la mayoría de las proteínas y producen proteínas de choque térmico en cuantía mayor. Las más abundantes pertenecen a la familia hsp70.

formación genética para sintetizar las proteínas de choque térmico.

A finales de los años setenta, las pruebas recabadas abonaban la idea según la cual la respuesta al choque térmico constituía una propiedad general de todas las células. Tras la subida repentina de la temperatura, en bacterias, levaduras, plantas y células animales cultivadas se producía un aumento en la expresión de proteínas de tamaños similares a las de choque térmico de *Drosophila*. Más aún: las células sintetizaban una o más proteínas de choque térmico cuando eran expuestas a metales pesados, alcoholes y otros venenos metabólicos. Se empezó a sospechar que esta respuesta universal a la adversidad ambiental representaba un mecanismo celular básico de defensa. Las proteínas anti-estrés, que parecían expresarse sólo en momentos difíciles, formarían parte de la respuesta.

Las pruebas acumuladas durante los años siguientes confirmaron que las proteínas anti-estrés desempeñaban un papel activo en la defensa celular; se identificaron y aislaron los genes responsables de las mismas. Las mutaciones génicas producían anomalías celulares del mayor interés. En este contexto, las bacterias con mutaciones en genes para algunas de las proteínas anti-estrés presentaban defectos en la síntesis de ADN y ARN, no se dividían normalmente y eran incapaces de afrontar una proteolisis normal. Tampoco se desarrollaban a temperaturas altas.

No tardó en observarse que la respuesta al estrés desempeñaba también un papel importante en la resistencia de las células animales a breves exposiciones de temperaturas altas. Las células animales que sufrían un choque térmico suave —suficiente para aumentar los niveles de proteínas anti-estrés— soportaban mejor un segundo tratamiento térmico, letal en otras condiciones. Además, esas células termotolerantes eran menos susceptibles a otros agentes tóxicos. Se iba viendo poco a poco que la respuesta al estrés protegía a las células contra muchas agresiones ambientales.

El aislamiento y caracterización de genes de proteínas anti-estrés de diferentes organismos trajo una doble comprobación. En primer lugar, muchos genes de las proteínas anti-estrés guardaban estrecho parecido en todos los organismos considerados. El grupo de Elizabeth A. Craig, de la Universidad de Wisconsin, halló que los genes de las proteínas de choque térmico hsp70 (las proteínas con mayor tasa de inducción) de bacterias, levaduras y *Drosophila* se parecían en más del 50 por ciento. Las proteínas anti-estrés se habían conservado en el curso de la evolución y cumplían la misma e importante función en todos los organismos.

Se descubrió, en segundo lugar, que muchas proteínas anti-estrés se expresaban en células normales, no sometidas a tensión. Se subdividieron, pues, las proteínas anti-estrés en dos grupos: aquellas cuya expresión constitutiva acontece en condiciones de crecimien-

to normal y aquellas que se inducen sólo en células sometidas a estrés.

Se mantenía la perplejidad ante el hecho de que estímulos tóxicos de apariencia dispar provocasen siempre un aumento de la expresión del mismo grupo de proteínas. En 1980, Lawrence E. Hightower, de la Universidad de Connecticut, ofreció una explicación. Observó que muchos agentes que inducían la respuesta al estrés eran desnaturalizantes proteínicos, esto es, agentes que alteraban la conformación normal de las proteínas. Las proteínas son largas cadenas de aminoácidos plegadas con suma precisión. Cualquier alteración de su morfología puede provocar la pérdida de su función biológica.

Hightower sugirió que la acumulación intracelular de proteínas desnaturalizadas, o plegadas de una manera anormal, desencadenaba la respuesta anti-estrés. Las proteínas anti-estrés, razonaba, facilitarían la identificación y eliminación de las proteínas desnaturalizadas de las células traumatizadas. A los pocos años, Richard Voellmy, de la Universidad de Miami, y Alfred L. Goldberg, de Harvard, confirmaron la propuesta de Hightower. Bastaba la inyección de proteínas desnaturalizadas dentro de la célula para inducir una respuesta anti-estrés.

Varios laboratorios emprendieron la tarea de purificar y caracterizar las propiedades bioquímicas de las proteínas anti-estrés. La proteína de choque térmico más abundante, la hsp70, se convirtió en la molécula de moda. Con sondas moleculares, se comprobó que, tras un choque térmico, se acumulaba una gran cantidad de hsp70 en el interior del nucleolo, estructura donde se fabrican los ribosomas. Que la hsp70 estuviese allí resultaba desconcertante. En trabajos anteriores se había demostrado que, tras un choque térmico, las células dejaban de fabricar ribosomas, orgánulos donde se sintetizan las proteínas; de hecho, sus nucleolos se inundaban de partículas ribosómicas desnaturalizadas. Hugh R. B. Pelham, del Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigaciones Médicas de Cambridge, sugirió que las hsp70 podían reconocer proteínas intracelulares desnaturalizadas y devolverles su conformación correcta, biológicamente activa.

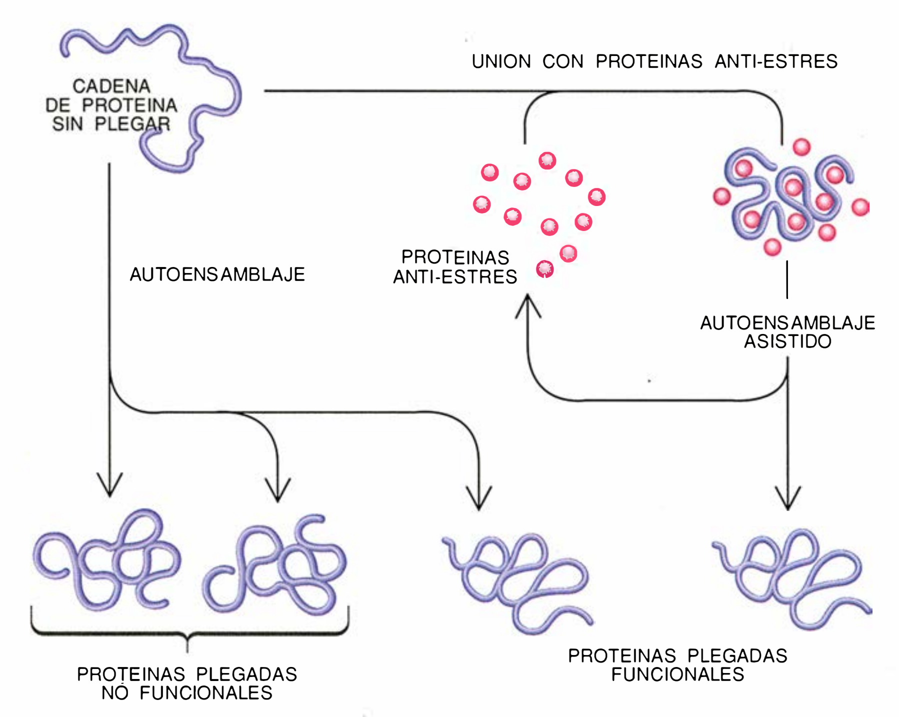
En 1986, Pelham y Sean Munro aislaron varios genes, todos los cuales determinaban proteínas parecidas a las hsp70. Una de las formas de hsp70 era idéntica a cierta proteína de unión a las inmunoglobulinas (BiP). Otros investigadores habían demostrado que la BiP participaba en la preparación de las inmunoglobulinas, o anticuerpos, y de otras proteínas que se excretan. La BiP se une a la proteína recién sintetizada conforme se va ensamblando (plegando), para adoptar su forma madura. Si la proteína no fracasa en su plegamiento correcto, queda unida a la BiP y termina degradándose. Además, en las condiciones en que se acumulaban proteínas con ensamblaje deficiente, las células sintetizaban más BiP.

Todas esas observaciones venían a indicar que la BiP participaba en los primeros pasos de la secreción de proteínas. La BiP actúa a modo de supervisor molecular, o control de calidad: deja que las proteínas correctamente ensambladas entren en la ruta de secreción y rechaza las que son incapaces de plegarse bien.

A medida que se descubrían nuevos genes de proteínas similares a hsp70 y BiP, se consolidaba la hipótesis de la existencia de una "familia" entera de proteínas hsp70. Todas comparten ciertas propiedades; por ejemplo, su gran afinidad por el trifosfato de adenosina (ATP), la molécula que constituye el carburante intracelular universal. Salvo una, todas también se hallan en las células que crecen en condiciones normales de cultivo (son constitutivas), aunque en las células sometidas a estrés metabólico se sintetizan en cuantía superior. Por último, todas participan en los procesos de maduración de otras proteínas celulares, como hace la BiP; así, las formas citoplásmicas de la hsp70 interaccionan con otras proteínas que se están sintetizando en los ribosomas.

En las células sanas o no sometidas a tensión, la interacción entre los miembros de la familia hsp70 con proteínas inmaduras es transitoria y dependiente de ATP. En condiciones de estrés metabólico, sin embargo, cuando las proteínas recién sintetizadas tienen problemas para madurar normalmente, las proteínas permanecen unidas a una hsp70 "acompañante".

Mientras se asentaba la idea de un compromiso de la familia hsp70 con las primeras etapas del proceso de maduración de las proteínas, otra familia de proteínas anti-estrés ofrecía resultados interesantes. Los trabajos pioneros de Costa Georgopoulos, de la Universidad de Utah, y de otros demostraban que las mutaciones en los genes de dos proteínas anti-estrés, groEL y groES, conferían resistencia a las bacterias frente a los virus que dependían de la maquinaria celular suministrada por sus hospedadores. El funcionamiento incorrecto de groEL y groES impedía el ensamblaje adecuado de las proteínas víricas.

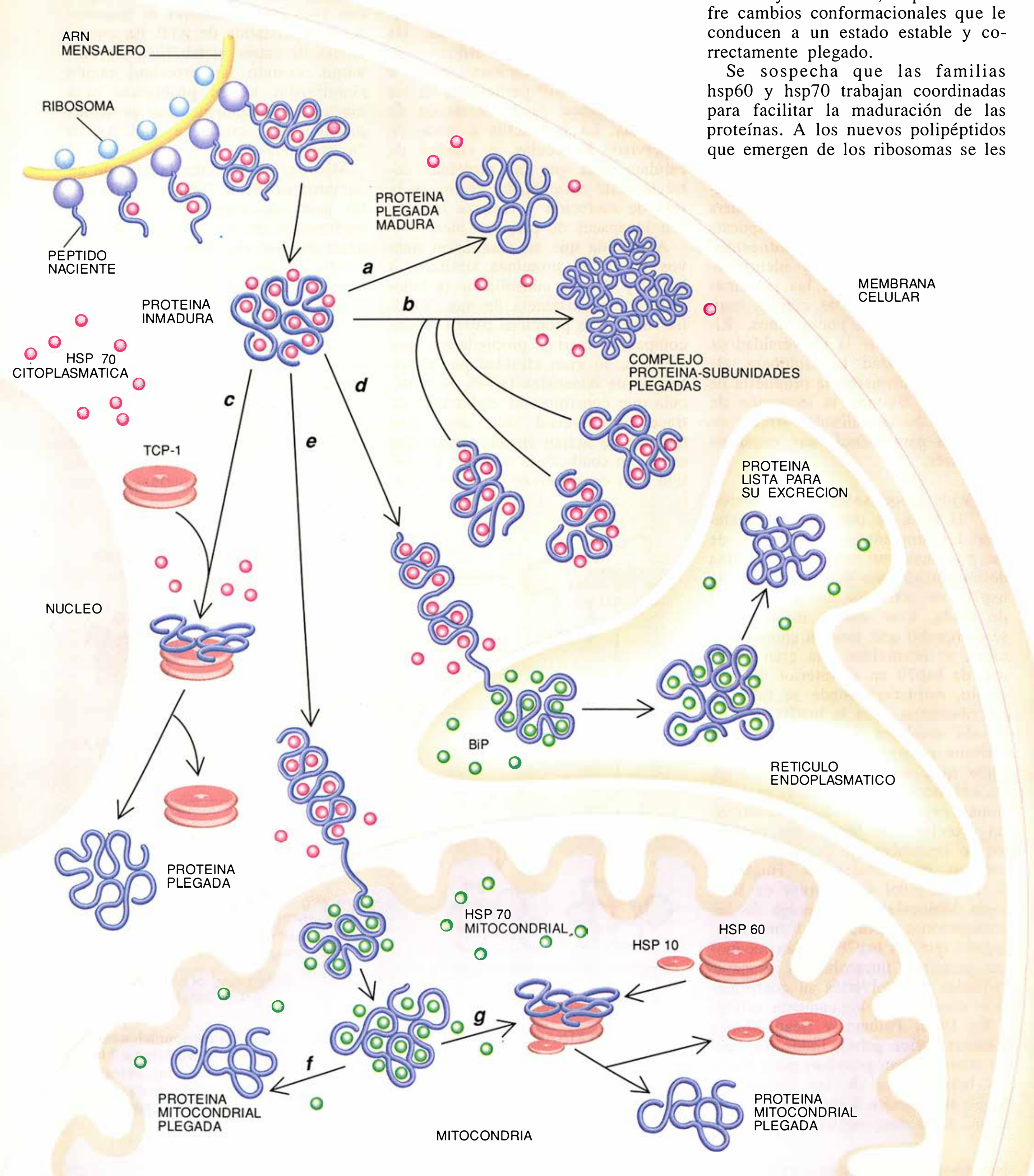


4. LAS PROTEINAS SE PLIEGAN espontáneamente, merced a los condicionamientos termodinámicos impuestos por la secuencia de aminoácidos hidrofílicos e hidrofóbicos de la propia proteína. La capacidad autoensambladora de las proteínas, adoptando configuraciones biológicamente activas, no evita la aparición de errores ocasionales. Las proteínas anti-estrés ayudan a las proteínas celulares para que el plegamiento se desarrolle con rapidez y eficacia.

Se encontraron proteínas similares a las groEL y groES bacterianas en plantas, levaduras y células animales. Denominadas hsp10 y hsp60, esas proteínas sólo se han dejado ver en mitocondrias y cloroplastos, aunque podría haber formas diversas en otros compartimentos intracelulares.

La bioquímica ha recabado pruebas decisivas sobre la necesidad de hsp10 y hsp60 para el ensamblaje y plegamiento de las proteínas. La molécula de hsp60 consta de dos anillos superpuestos, de siete subunidades cada uno. Esta macroestructura parece servir de "banco de trabajo" al que acceden las proteínas que aún no se han plegado; allí adquieren su estructura tridimensional final. El proceso de plegado, muy dinámico, abarca varios episodios de unión y desunión. Cada episodio requiere energía, que es suministrada por la rotura enzimática del ATP, y la participación de las moléculas de hsp10. Después de múltiples rondas de uniones y desuniones, la proteína sufre cambios conformacionales que le conducen a un estado estable y correctamente plegado.

Se sospecha que las familias hsp60 y hsp70 trabajan coordinadas para facilitar la maduración de las proteínas. A los nuevos polipéptidos que emergen de los ribosomas se les



une la hsp70, en el citoplasma o dentro de un orgánulo. Esta unión impide quizá que la cadena polipeptídica en gestación se pliegue antes de tiempo. Una vez terminada su síntesis, el nuevo polipéptido, unido a su hsp70 de compañía, se transfiere a una hsp60, donde se produce el plegado y ensamblaje con otros componentes proteínicos.

Estas nuevas consideraciones, relativas a las propiedades de hsp70 y hsp60, han obligado a reconsiderar los primeros modelos sobre el plegamiento de las proteínas. Los trabajos realizados en los años cincuenta y sesenta establecieron que una proteína desnaturalizada podía volver a plegarse espontáneamente una vez eliminado el agente desnaturalizante. Esos trabajos, que le valieron el premio Nobel de química a Christian B. Anfinsen en 1972, fijaron el concepto de autoensamblaje de las proteínas. Según ese modelo, el proceso de plegamiento viene dictado por la secuencia de aminoácidos del polipéptido. Los aminoácidos hidrofóbicos (no solubles en agua) se situarían en el interior de la molécula plegada, mientras que los hidrofílicos (solubles en agua) se instalarían en el exterior de la proteína, para asegurar su contacto con el medio acuoso celular. De esa forma, serían imposiciones termodinámicas las que dirigirían el plegamiento.

El principio de autoensamblaje constituye, así se dice, la fuerza primaria que dirige a las proteínas hacia su conformación final. Pero muchos sospechan que el plegamiento de la proteína requiere la actividad de otros componentes celulares, verbigracia, las proteínas anti-estrés de la familia hsp60 y hsp70.

En consonancia con ello, R. John Ellis, de la Universidad de Warwick, y otros le han puesto, a las proteínas hsp60, hsp70 y otras anti-estrés, el remoquete de "carabinas" o "chaperonas". Aunque esas moléculas no portan información para el plegamiento o ensamblaje de proteínas, aseguran que tales procesos ocurran con rapidez y precisión. Aceleran el autoensamblaje reduciendo la posibilidad de que la proteína inmersa en el proceso de maduración siga una vía de plegamiento incorrecta.

Una vez establecido el papel de "carabinas" moleculares para ciertas proteínas anti-estrés, en células sanas y no estresadas, la atención recae ahora en la causa por la que tales proteínas se expresan más en situaciones de tensión. Las condiciones que provocan un incremento en la expresión de esas proteínas nos pueden orientar sobre el particular. Las temperaturas que activan la respuesta al estrés pueden desnaturalizar algunas proteínas en las células. Las proteínas desnaturalizadas por calor, como las recién sintetizadas y aún no plegadas, pueden servir de dianas donde se engarcen las hsp70 y hsp60. Mientras más proteínas desnaturalizadas se unan a las hsp70 y hsp60, menos carabinas moleculares libres habrá, limitándose la capacidad de síntesis de nuevas proteínas. La célula detecta esa escasez y responde aumentando la fabricación de nuevas proteínas anti-estrés que actúan de carabinas moleculares.

Se sospecha que un aumento en la expresión de las proteínas anti-estrés podría constituir otra condición para la recuperación celular tras un trauma metabólico. Si el calor, o cualquier otra agresión metabólica, desnaturaliza irreversiblemente una cantidad notable de proteínas, la célula tiene que reemplazarlas. Aumentando los niveles de proteínas anti-estrés que actúan de carabinas moleculares, se facilita la síntesis y ensamblaje de nuevas proteínas. Además, los niveles altos de proteínas anti-estrés podrían evitar la desnaturalización térmica de otras proteínas celulares.

La reparación y síntesis de proteínas son funciones vitales. No obstante, las proteínas anti-estrés cumplen también un papel importante en la regulación de otros sistemas de proteínas y respuestas celulares. A este propósito cobra especial sentido la familia hsp90 de proteínas anti-estrés.

El interés inicial por hsp70 se avivó con las publicaciones que la asociaban con oncovirus. A finales de los setenta y principios de los ochenta, los oncólogos centraban su atención en los mecanismos utilizados por ciertos virus para infectar células y transformarlas en malignas. En el caso del virus del sarcoma de Rous, se había localizado un gen responsable del desarrollo de las propiedades malignas. La enzima que producía, pp60src, actuaba sobre otra proteína implicada en la regulación del crecimiento celular. Tres laboratorios hicieron saber que, tras ser sintetizada en el citoplasma, pp60src se asociaba rápidamente con dos proteínas: la p50 y la hsp90.

Cuando pp60src está en el citoplasma, unida a sus dos acompañantes, se muestra enzimáticamente inactiva. Si el trío de moléculas se desplaza a la membrana plasmática, hsp90 y p50 se retiran, y la pp60src se sitúa en la membrana y se activa. Se han descubierto interacciones similares entre hsp90, p50 y enzimas causantes de cánceres determinadas por algunos virus tumorales. Cuando están unidas a hsp90 y p50, esas enzimas víricas son incapaces de actuar sobre sus dianas celulares, condición necesaria para el desarrollo maligno.

Algunos estudios han vinculado también a hsp90 con otra clase importante de moléculas en células de mamíferos: los receptores de hormonas esteroides. Participan éstas en procesos biológicos vitales; los glucocorticoides, por ejemplo, ayudan a eliminar las inflamaciones. Otras hormonas esteroides intervienen en la diferenciación sexual y el desarrollo. Cuando un receptor de esteroides se une a su hormona específica, el receptor puede interaccionar con el ADN y activar o reprimir la expresión de ciertos genes.

Era importante saber en virtud de qué los receptores de esteroides se mantenían inactivos dentro de las células. Lo que se consiguió cuando se caracterizaron las formas activa e inactiva del receptor de la progesterona. En ausencia de la hormona, el receptor se asocia con varias proteínas celulares, entre ellas la hsp90, que lo mantienen inactivo. Cuando se une a la progesterona, el receptor se libera de la hsp90 y experimenta una serie de transformaciones que lo capacitan para unirse al ADN. Como en el caso de las enzimas víricas, la

5. RUTAS DE ENSAMBLAJE Y DISTRIBUCION de proteínas dentro de la célula, controladas por proteínas de estrés. En mucho casos, proteínas anti-estrés distintas trabajan conjuntamente. Las formas citoplásmicas de la hsp70 se unen a proteínas que están sintetizándose en los ribosomas, para impedir que se plieguen antes de tiempo. La hsp70 acaba por separarse de la proteína y deja que ésta se pliegue y adopte su forma funcional (*a*), o que se asocie con otras proteínas para formar complejos multiméricos mucho mayores (*b*). En algunos casos, la hsp70 cede el sitio a otra proteína anti-estrés, la TCP-1, antes de que se produzca el ensamblaje final (*c*). Si la proteína debe excretarse, se transporta hasta el retículo endoplasmático, y allí la BiP, u otra proteína anti-estrés parecida, dirige su ensamblaje definitivo (*d*). Otras proteínas pasan a las mitocondrias u otros orgánulos (*e*). Dentro de la mitocondria, una nueva forma especializada de hsp70 se encarga de ayudar en el proceso final de ensamblaje (*f*), aunque en muchos casos la proteína pasa por un complejo de hsp60 y hsp10 (*g*). La molécula de hsp60 actúa de "banco de trabajo", sobre el que se pliega la proteína mitocondrial.

hsp90 parece regular la actividad biológica de los receptores de hormonas esteroides.

Se atisban posibles aplicaciones prácticas de la respuesta al estrés, de cuyo éxito saldría beneficiada la medicina. Cuando un individuo sufre un ataque al corazón o una apoplejía, se resiente el riego sanguíneo del corazón o el cerebro y se produce isquemia. Mientras están faltos de oxígeno, los órganos afectados no pueden mantener sus niveles normales de ATP, y ello origina fallos en procesos metabólicos esenciales. Cuando el flujo sanguíneo se restablece, el órgano isquémico se reoxigena rápidamente, lo que también puede ser perjudicial. Con frecuencia, la reexposición rápida al oxígeno genera especies moleculares muy reactivas, los radicales libres, que pueden producir daños ulteriores.

Se ha visto, en estudios con animales, que, tras episodios breves de isquemia y reperfusión, se induce una respuesta al estrés en el corazón y en el cerebro. La magnitud de la respuesta guarda una relación directa con la gravedad del daño. Los clínicos analizan la posibilidad de utilizar los cambios en los niveles de proteínas anti-estrés como indicadores de los daños sufridos por tejidos y órganos.

La célula que produce mucha proteína anti-estrés sobrevive mejor al daño isquémico. Si la farmacología lograra, pues, elevar los niveles de proteínas anti-estrés, se le ofrecería a los tejidos y órganos afectados una protección adicional; con cuya terapia se reduciría la lesión hística en las isquemias quirúrgicas y se mejoraría la eficacia de los trasplantes, blanco frecuente de los efectos de la isquemia y la reperfusión.

Reviste particular interés la respuesta a la tensión en el caso de infecciones y enfermedades inmunitarias. La tuberculosis, malaria, lepra, esquistosomiasis y otras enfermedades que afectan a millones de personas cada año, son consecuencia de infecciones bacterianas o de microorganismos parásitos. Las proteínas anti-estrés fabricadas por esos organismos suelen ser los principales antígenos, o proteínas diana, que el sistema inmunitario utiliza para reconocer y destruir a los invasores. El sistema inmunitario del hombre se halla en constante alerta contra formas extrañas de proteínas anti-estrés. Las proteínas anti-estrés de varios patógenos, si se producen en el laboratorio con técnicas de ADN recombinante, servirían de vacunas potenciales contra las infecciones microbianas. Y, dado su carácter inmunogénico, las proteínas anti-estrés bacterianas valdrían quizá de coadyuvantes. Adosadas a proteínas víricas, estimularían la respuesta inmunitaria contra infecciones víricas.

Se ha descubierto una posible conexión entre proteínas anti-estrés y las enfermedades de autoinmunidad. La mayoría de éstas surgen cuando el sistema inmunitario se rebela contra antígenos presentes en los tejidos sanos. En ciertas formas, pensemos en la artritis reumatoide, la espondilitis anquilosante y el lupus eritematoso sistémico, se observan a veces anticuerpos contra las propias proteínas anti-estrés del paciente. Si este tipo de observaciones recibe suficiente confirmación, podría recurrirse a esos polipéptidos para el diagnóstico y tratamiento de las enfermedades de autoinmunidad.

Habida cuenta de la similaridad estructural entre las proteínas anti-estrés microbianas y las humanas, el sistema inmunitario podría hallarse obligado a distinguir las pequeñas diferencias entre las proteínas anti-estrés propias y las de los microorganismos invasores. La posibilidad de que las proteínas anti-estrés se encuentren en la interfase entre tolerancia a un organismo infeccioso y autoinmunidad es una idea interesante y, hoy, debatida.

La presencia de anticuerpos contra proteínas anti-estrés microbianas puede ser de utilidad en el diagnóstico. Pensemos en la bacteria *Chlamydia trachomatis*, responsable de distintas enfermedades; el tracoma, una de ellas, es la causa principal de ceguera evitable. La bacteria provoca también inflamaciones pélvicas, origen importante de esterilidad en mujeres. Las infecciones de clamidias suelen desencadenar la producción de anticuerpos contra antígenos clamidianos, algunos de los cuales son proteínas anti-estrés. La repuesta inmunitaria suele ser eficaz y acaba eliminando al patógeno. Sin embargo, en algunos individuos, sobre todo en reinfectados o con infecciones clamídicas crónicas, la respuesta inmunitaria se despierta con particular agresividad y provoca daños y cicatrices en los tejidos vecinos.

El equipo de Richard S. Stephens, de la Universidad de California, ha observado que más del 30 % de las mujeres con inflamación pelviana y

6. RESPUESTA a hormonas esteroides, controlada en parte por hsp90. Esta proteína anti-estrés mantiene inactivos a los receptores de esteroides. En presencia de la hormona, se une al receptor y la proteína hsp90 se separa. El complejo formado por el receptor activado puede entonces unirse al ADN e inducir la expresión de ciertos genes.

más del 80 % de las que han sufrido embarazos ectópicos presentaban niveles desmesurados de anticuerpos contra las proteínas anti-estrés groEL de clamidia. El control de los niveles de anticuerpos contra esas proteínas puede ser útil para identificar a las mujeres con alto riesgo de embarazos ectópicos o esterilidad.

La relación entre proteínas anti-estrés, respuesta inmune y enfermedades de autoinmunidad cobra mayor interés a la luz de otros descubrimientos recientes. Algunos miembros de la familia de proteínas hsp70 son muy similares, en estructura y función, a los antígenos de histocompatibilidad. Estos participan en las etapas precoces de la respuesta inmunitaria, presentando antígenos foráneos a las células del sistema inmunitario.

La cuestión a resolver era cómo una proteína de histocompatibilidad podía unirse a una gama tan amplia de péptidos antigénicos diferentes. El grupo de Don C. Wiley, de Harvard, acaba de publicar algunos datos que ayudan a entenderlo. Han determinado la estructura tridimensional de la proteína de histocompatibilidad de clase I; hay en ella una suerte de surco donde pueden prenderse diferentes péptidos antigénicos. James E. Rothman, de Princeton, ha comprobado que algunos miembros de la familia hsp70 están capacitados también para unirse a péptidos cortos. Esta propiedad de la hsp70 es coherente con su papel como proteína "acompañante" de las cadenas polipeptídicas no plegadas o recién sintetizadas.

Los modelos elaborados mediante computador revelan que hsp70 posee un sitio de unión a péptidos análogo al de las proteínas de histocompatibilidad de clase I. La manifiesta similitud entre las dos clases de proteínas parece aún más interesante ya que varios de los genes que determinan proteínas hsp70 se alojan en sitios muy cercanos a los de las proteínas de histocompatibilidad. En resumen, todas las observaciones corroboran que las proteínas anti-estrés son elementos del sistema inmunitario.

La manipulación de la respuesta al estrés facilitaría el desarrollo de nuevas terapias contra el cáncer. Los tumores se muestran, por lo común, más sensibles a la temperatura que los tejidos normales. Todavía se halla en fase de experimentación la idea de elevar la temperatura de los tejidos para extirpar los tumores, pero los ensayos preliminares manifiestan que, con hipertermia dirigida, sola o con radiaciones y otras terapias al uso, se puede conseguir la regresión de ciertos tipos de tumores.

Algunas condiciones que inducen la expresión de proteínas anti-estrés

FACTORES AMBIENTALES
- CHOQUE TERMICO
- METALES PESADOS
- INHIBIDORES DEL METABOLISMO ENERGETICO
- ANALOGOS DE AMINOACIDOS
- AGENTES QUIMIOTERAPEUTICOS

SITUACIONES DERIVADAS DE ENFERMEDADES
- INFECCIONES VIRICAS
- FIEBRE
- INFLAMACIONES
- ISQUEMIA
- HIPERTROFIA
- EFECTOS OXIDANTES
- TUMORACIONES

SITUACIONES CELULARES NORMALES
- CICLO DE DIVISION CELULAR
- FACTORES DE CRECIMIENTO
- DESARROLLO Y DIFERENCIACION

La respuesta al estrés no es, forzosamente, un aliado de los médicos en el tratamiento del cáncer; puede convertirse en un obstáculo. Dado que las proteínas anti-estrés protegen a las células, las terapias anticancerosas que inducen la expresión de proteínas anti-estrés pueden provocar la resistencia del tumor a tratamientos posteriores.

Se empieza a explorar el uso potencial de la respuesta al estrés en toxicología. Los cambios en los niveles de proteínas anti-estrés, especialmente los producidos en células traumatizadas, podrían ayudar en la evaluación de la toxicidad de drogas, cosméticos, aditivos alimentarios y otros productos.

Mediante el recurso a las técnicas de ADN recombinante, se han construido líneas cultivadas de células "chivatas" para el estrés, que podrían utilizarse para detectar riesgos biológicos. En esas células, las secuencias de ADN que controlan la actividad de los genes de proteínas anti-estrés se han unido a un gen chivato que determina la síntesis de una enzima (la beta-galactosidasa, por ejemplo). Cuando las células experimentan algún estrés metabólico, y producen más proteínas anti-estrés, sintetizan la enzima chivata, que se detecta fácilmente con una prueba bioquímica. La cantidad de beta-galactosidasa expresada en una célula puede medirse con un sustrato químico. Si hay enzima chivata, las células se tornan azules, y la intensidad del color es directamente proporcional a la concentración enzimática celular.

Con esas células chivatas, podemos determinar la cantidad de respuesta al estrés inducida por agentes o tratamientos químicos. La técnica podría introducirse también en la detección de contaminantes ambientales peligrosos, muchos de los cuales provocan respuesta al estrés. Algunos laboratorios han comenzado a desarrollar organismos transgénicos chivatos para esa respuesta. Eve G. Stringham y E. Peter M. Candido, de la Universidad de la Columbia Británica, junto con la empresa Stressgen Biotechnologies, han creado gusanos transgénicos en los que un gen chivato para la beta-galactosidasa está bajo el control del promotor de una proteína de choque térmico. Cuando esos gusanos transgénicos se exponen a varios tipos de contaminantes, expresan el gen chivato y se tornan azules. El laboratorio de Candido se apresta a resolver si esos gusanos chivatos sirven para detectar una gama más amplia de contaminantes.

Voellmy y Nicole Bournias-Vardiabasis, del hospital "Ciudad de la Esperanza", en Duarte, han seguido una estrategia similar para crear una línea de moscas transgénicas chivatas. Las moscas se vuelven azules cuando se exponen a teratógenos, agentes de las anomalías producidas en el desarrollo fetal. Este bioensayo es sensible a muchos de los teratógenos que se sabe causan defectos en el hombre. El camino para el desarrollo de otros organismos transgénicos chivatos que pudieran ser útiles en ensayos toxicológicos y ambientales parece, pues, abierto.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SUCCESSIVE ACTION OF DNAK, DNAJ AND GROEL ALONG THE PATHWAY OF CHAPERONE-MEDIATED PROTEIN FOLDING. Thomas Langer, Chi Lu, Harrison Echols, John Flanagan, Manajit K. Hayer y F. Ulrich Hartl en *Nature*, vol. 356, n.º 6371, páginas 683-689, 23 de abril de 1992.

MAMMALIAN STRESS RESPONSE: CELL PHYSIOLOGY, STRUCTURE/FUNCTION OF STRESS PROTEINS, AND IMPLICATIONS FOR MEDICINE AND DISEASE. William J. Welch en *Physiological Reviews*, vol. 72, páginas 1063-1081, octubre de 1992.

Perfiles

Luis Alonso

ANTONIO GARCÍA-BELLIDO: *génesis y desarrollo de una nueva ciencia*

No aparece en las negritas de las gacetillas sedicentes culturales. Ni es de cuna aristocrática, aunque lo sugieran sus apellidos realengos, García-Bellido y García de Diego. Tiene, por contra, a sus espaldas, anchas espaldas, una herencia de saber de rara singularidad en la España contemporánea. Hijo de iberista afamado, nieto de lexicógrafo famoso y hasta cuñado de experto filólogo.

Buscar la raíz de las cosas —llámense fundación de colonias foceas del Mediterráneo occidental o establecimiento de castros astures, derivación de este participio del español de Hita o etimología de aquel aoristo griego— debió ser preocupación familiar que hubo de compartir, como si algo suyo fuera, en los años menesterosos de la posguerra.

Antonio García-Bellido nació en Madrid en 1936. "En la biblioteca de mi padre, enriquecida además con la del paleontólogo Hugo Obermaier que nos la legó, había libros de divulgación científica. De su lectura surgió mi vocación por la biología del desarrollo; el cómo y el porqué se hace un organismo a partir de un huevo." García-Bellido entra a los diecisiete años en la Universidad de Madrid, de donde sale licenciado en biología a los 22.

No existió en la España de la primera mitad del siglo una línea investigadora sostenida en el campo de la genética, por más que figuras aisladas (Fernández Nonídez y, sobre todo, Antonio de Zulueta) realizaran algunos trabajos decorosos. Pero es una genética morganiana, estática, que atiende a la relación de vecindad de los genes en el cromosoma o su estructura interna.

A García-Bellido le interesaba, por contra, de qué modo los genes van configurando paso a paso el organismo embrionario, la morfogénesis. Se recibía en sus años estudiantiles, y se recibe, una enseñanza dogmática, de apuntes. Enfrascarse en el laboratorio o consultar otras fuentes podía acarrear varapalos inmisericordes, como el suspenso en genética que estuvo a punto de anotarse en su brillante expediente académico por ir más allá de la lección dictada.

Aprende por su cuenta alemán e inglés. Sale al extranjero. "Después de una estancia de siete meses en el departamento de zoología de Cambridge con el profesor W. B. Wigglesworth, empecé la tesis doctoral, sobre fenogenética del locus *furrowed* de *Drosophila melanogaster*, que defendí en la Universidad Complutense en 1962. Y me casé." No da por terminada su fase de formación. Con María Paz Capdevila, su mujer y, andando el tiempo, compañera de investigación, se marcha al Instituto de Anatomía Comparada de la Universidad de Zurich para trabajar con E. Hadorn; ha empezado ya a publicar en alemán algunos artículos sobre fisiología y diferenciación celular, que remata con el escrito, en colaboración con Hadorn, sobre proliferación de cultivos celulares de *Drosophila*.

Antonio García-Bellido inició una nueva línea de la genética atraído por el cómo y el porqué se hace un organismo a partir de un huevo

"Volvimos a España en 1965 y, después de unos meses, empecé mi segundo período posdoctoral en el Instituto de Tecnología de California." Los dos años que transcurren aquí con A. H. Sturtevant y E. Lewis no son de mero discente. "Sturt", del mítico trío (con Bridges y Muller) que apuntala la escuela de Morgan, es ya un anciano, "muy brioso que no se perdía ninguna lección del seminario donde yo exponía lo que estábamos realizando en biología del desarrollo en Europa. Era quizás el más capacitado para maravillarse ante el despliegue y transformación celular, fenómenos desconocidos para los acostumbrados a trabajar en cortes histológicos fijados".

García-Bellido esboza ya lo que será su teoría apogenética del desarrollo, enfoque alternativo a la explicación clásica o epigenética; de acuerdo con esta última, en las células embrionarias iniciales los campos morfogenéticos de regulación definidos por distribución de morfógenos determinan la diferenciación de células genéticamente iguales o inespecíficas. En la tesis apogenética de García-Bellido, el genoma activo de cada célula determina un comportamiento celular específico, y corresponde a éste organizar las células en sistemas supracelulares.

Tal visión fisiológica del desarrollo la ha ido consolidando en las seis áreas de investigación donde ha demostrado un interés mayor: bases genéticas del reconocimiento celular, mosaicos genéticos y mapas del blastodermo, análisis clonal de sistemas en desarrollo, genética de las células somáticas, transregulación y

sintagmas genéticos e interacciones intercelulares en la morfogénesis. Se adentró en la primera durante su estancia en Zurich, en la segunda y tercera líneas estando ya en California, inició las dos siguientes a comienzos del decenio de los setenta, y en los años ochenta la última.

¿Qué pautas se siguen en la formación de los epitelios de las alas y patas de la mosca del vinagre? En el laboratorio de Hadorn aborda las bases genéticas del reconocimiento celular realizando experimentos de disociación de células procedentes de discos imaginales con su reagrupación y metamorfosis posterior, que revelan unas configuraciones complejas y propias del disco de origen. (Los discos imaginales son grupos de células larvarias que intervienen en la formación de las estructuras del adulto. En *Drosophila* hay 19, nueve pares más el disco genital, único.) Creíase, y lo defendía Hadorn, que la configuración en patrones normales de los agregados celulares nacía *ex novo* a partir de células indiferenciadas.

García-Bellido diseña un nuevo ensayo con células marcadas extraídas de discos imaginales distintos o de diferentes regiones del mismo disco imaginal y prueba su tesis de la autonomía celular, es decir, se da un alto grado de determinación celular en la diferenciación de los tipos cuticulares y poseen las células implicadas unas propiedades de reconocimiento que tienen que ver con la posición que ocupaban en el disco de origen. Esta línea de investigación, objeto ahora de análisis molecular en diversos laboratorios, la irá refinando solo o en colaboración con alguno de sus primeros doctorandos en el Instituto de Genética del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Algo tendrá que ver su afición a la filosofía (dedicó su discurso de ingreso en la Academia de Ciencias a una lectura chomskyana de la genética) y a la música de cámara con su estilo de trabajo solitario. "No quiero que nadie envejezca a mi lado. Prefiero incorporar gente nueva a las nuevas ideas y a las nuevas líneas de investigación. Sí, me gusta seguir por mí mismo el proyecto del comienzo al fin. Otra cosa son los seminarios. Ahí es donde cada uno da la medida de sí mismo."

La autonomía de la célula le permite investigar el análisis genético de la herencia celular en los discos imaginales. Se ocupa así de alelos letales en mosaicos genéticos para definir el tiempo de acción de los genes, valorar el efecto de las mutaciones en la proliferación y en la diferenciación celulares, y, en general, explorar los procesos de desarrollo durante el período que media entre la formación del cigoto y la constitución del organismo a término. No es poca la virtualidad de ese análisis, extendido hoy al plano molecular, que permite acotar la función de este o aquel gen, así como identificar redes de regulación génica.

Pero las ideas y los trabajos de laboratorio de García-Bellido no hubieran llegado tan pronto a los manuales (el "Alberts", por ejemplo), ni por supuesto sería hoy miembro de la Regia Sociedad Londinense, de la Academia Nacional estadounidense de Ciencias y cien más, si Francis Crick, el descubridor con Watson de la estructura helicoidal del ADN, no hubiera reconocido desde la tribuna de *Science* en 1975 el alcance de los mismos. "Nos proponemos en este artículo (lo firma con P. A. Lawrence) describir la investigación sobre el desarrollo de los epitelios intactos y, de manera particular, los importantes resultados e ideas del profesor Antonio García-Bellido y su grupo de Madrid, que todavía no son suficientemente conocidos. Es nuestra intención explicar con la mayor nitidez posible la naturaleza de esas ideas y el tipo de experimentos acometidos para respaldarlas."

Crick y Lawrence se refieren a la tercera línea de inquisición mencionada: el análisis clonal de sistema en desarrollo que le condujo al descubrimiento de los compartimentos supracelulares.

En la investigación del linaje celular se parte de mosaicos genéticos producidos por recombinación genética inducida por rayos X. Los clones de células mutantes permiten determinar distintos parámetros cuantitativos, desde el número de células que hay en el primordio hasta la ubicación de las estructuras que estamos investigando o la emigración local de ciertas células, así como establecer propiedades cualitativas: morfología de los clones, segregación de los linajes que originan las estructuras buscadas y otras.

(Algo menos espectacular, pero no menos decisivo para los trabajos de García-Bellido fue el sacar del terreno de la erudición biológica la recombinación cromosómica que se opera durante la división celular normal, la mitosis, y en aprovechar las posibilidades que le ofrecía la inducción de mutaciones letales.)

El fruto más divulgado del análisis clonal ha sido la cartografía del embrión en desarrollo, esos mapas con un lejano parecido con el de los cuatro colores que dividen los territorios que más tarde habrán de conformar los segmentos de la mosca, sus capas germinales y hasta las quetas o los tricomas.

Se expresa con claridad precisa cuando habla. Cordial. No mira el reloj. Duro y seco con el provincianismo regionalista, en todos los sentidos, que ha empapado la médula de la investigación y docencia españolas. Reacio al direccionismo petulante: "He sufrido por la impotencia, por la frustración de ver que la sugerencia que parece razonable, positiva y justa no puede llevarse a cabo por la malicia y la desidia o cobardía de los responsables de la acción."

La combinación del análisis genético y la clonación celular desembocó también en su idea de los genes selectores. Los selectores, con los realizadores, son jerarquías de genes que convierten señales genéticas específicas de posición en operaciones de desarrollo y, a la postre, en diferenciación celular espacial. Son la clave para comprender, hoy, el tamaño, la forma del ala o el patrón de venación en *Drosophila*. Pero la existencia de compartimentos y conservación de los mismos genes selectores y realizadores en otros organismos hace pensar que mañana, quizás, entenderemos cómo se generan las circunvoluciones del cerebro humano. El camino está abierto.

"No quiero que nadie envejezca a mi lado. Prefiero incorporar gente nueva a las nuevas ideas y a las nuevas líneas de investigación. Sí, me gusta seguir por mí mismo el proyecto del comienzo al fin. Otra cosa son los seminarios. Ahí es donde cada uno da la medida de sí mismo."

Ciencia y sociedad

Biofísica molecular

Interacciones inespecíficas ADN-ligando

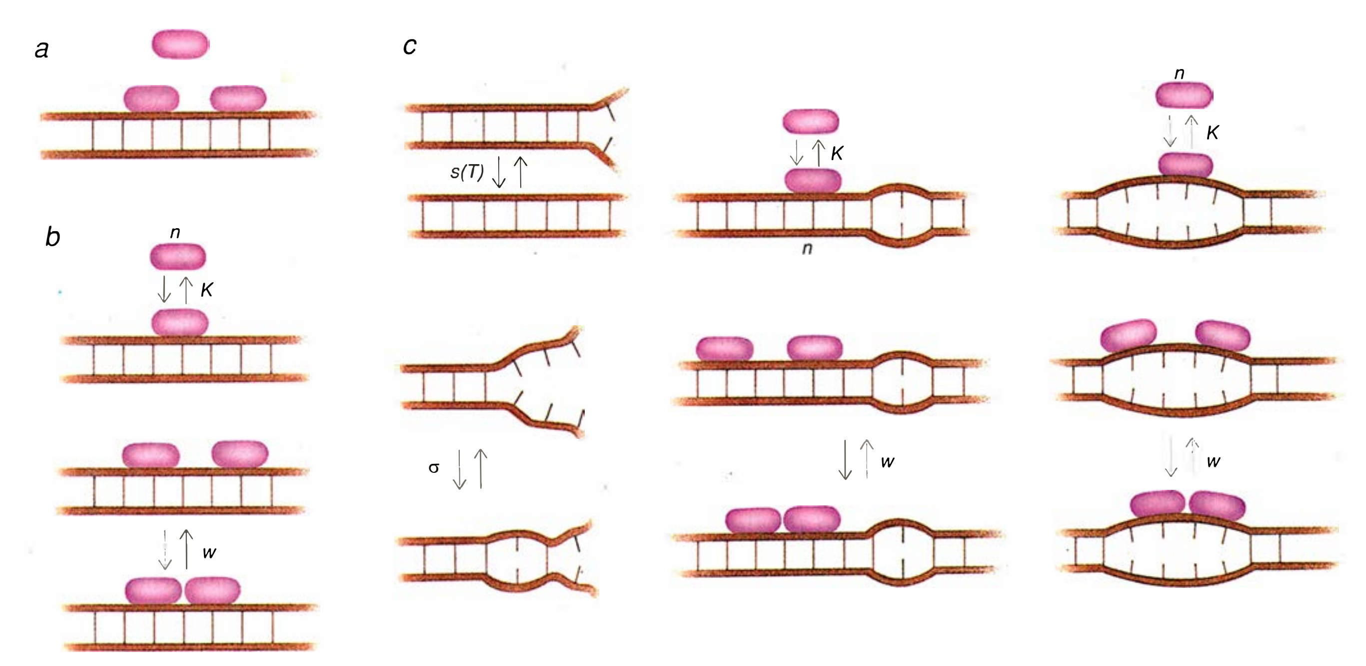
De entre las diferentes moléculas que interaccionan con el ADN, existe un numeroso grupo que lo hace sin presentar una afinidad especial por ninguna secuencia concreta del genoma. En virtud de esta propiedad, dichos ligandos se denominan inespecíficos. Ejemplos de los mismos los constituyen moléculas de principalísima importancia biológica y farmacológica, como son las histonas, las protaminas y las proteínas desestabilizantes de la doble hélice, así como un gran número de drogas antitumorales y antibióticos.

Para obtener información macroscópica de la interacción entre un ligando inespecífico y el ADN, es preciso conocer la distribución de equilibrio de las especies moleculares implicadas. La descripción de este equilibrio ha dado lugar al desarrollo de una teoría mecanoestadística donde se toma en consideración la unión de ligandos a redes monodimensionales. Dicho desarrollo ha tenido que abordar diferentes complicaciones, la principal de las cuales es la existencia de exclusión en la interacción: al ser esta inespecífica, los distintos sitios de unión se solapan, pudiendo entonces aparecer regiones de ADN libre con un tamaño lo suficientemente pequeño como para que no puedan unirse otras moléculas de ligando a las mismas (*figura a*).

Otras complicaciones son las interacciones entre ligandos unidos al ADN, los cambios conformacionales en la red, la interacción simultánea entre varios ligandos, etcétera. Por supuesto, este tipo de modelos pueden utilizarse en muy diversos sistemas biológicos en los que se dan interacciones de ligandos con biomacromoléculas lineales (ARN, actina, microtúbulos, colágeno y otros).

Una técnica usual para obtener experimentalmente la distribución de equilibrio son las isotermas de unión, entendiendo por tal la determinación de las concentraciones de ligando libre y unido a diferentes relaciones ADN/ligando, a una temperatura constante.

En el caso que nos ocupa, la clásica ecuación de Scatchard no suele ser válida para el ajuste a los datos experimentales, por lo que es necesario el planteamiento de nuevas expresiones para las correspondientes isotermas. Utilizando métodos combinatoriales, el grupo de A. S. Zasedatelev, del Instituto Engelhardt de Biología Molecular de Moscú, derivó en 1971 ecuaciones para las isotermas de unión en el caso de exclusión y con interacciones entre ligandos unidos en posiciones adyacentes. Ecuaciones similares fueron derivadas en 1974 por James D. McGhee y Peter H. von Hippel, de la Universidad de Oregon, recurriendo a pro-



Descripción de las interacciones inespecíficas entre el ADN y el ligando mediante redes unidimensionales. Empezamos por el fenómeno de exclusión (a)*: los diferentes sitios de unión de un ligando inespecífico se solapan, de modo que aparece un complicado problema estadístico al tratar de explicar el equilibrio de asociación. Se ofrece en* (b) *el modelo de McGhee-von Hippel, donde se supone que el ADN constituye una red unidimensional infinita. La interacción se describe por medio de tres parámetros: n (número de monómeros ocupados por el ligando), K (constante de asociación del ligando) y ω (constante de cooperatividad). Por último, en* (c) *se ilustra el modelo de McGhee; similar al de McGhee-von Hippel, el ADN puede, sin embargo, adoptar ahora dos estados: doble helicoidal y cadena sencilla. Para la transición bidireccional de hélice a cadena se utiliza un modelo de tipo Ising, con un parámetro de nucleación σ y un parámetro de elongación s (los equilibrios se representan en la figura). De nuevo, la interacción viene descrita por los tres parámetros K, n y ω, considerándose que el ligando se une o bien a ADN doble-helicoidal (ligando estabilizante, representado en la tercera columna) o a ADN de cadena sencilla (ligando desestabilizante, cuarta columna)*

babilidades condicionales. En ambos casos, la interacción viene descrita por tres parámetros (*figura b*): *n*, o número de monómeros (pares de bases en el ADN doble helicoidal) ocupados por el ligando unido; *K*, o constante de asociación del ligando, y ω, o constante de cooperatividad (constante adimensional que representa las interacciones entre ligandos unidos en posiciones adyacentes).

La derivación de expresiones analíticas correspondientes a la isoterma teórica se complica enormemente cuando se consideran sistemas menos sencillos. En estos casos es conveniente la utilización de otros métodos matemáticos especialmente concebidos para la descripción de "redes", que siempre permiten calcular la isoterma teórica numéricamente, y en muchos casos permiten también su construcción analítica. Nos referimos al método *matricial* (que describe lo mismo redes finitas que infinitas, así como redes homogéneas o heterogéneas) y al método *de funciones generatrices de secuencia* (FGS, sólo válido para redes infinitas homogéneas). Este último fue propuesto en 1964 por Shneior Lifson, del Instituto Weizmann de Ciencias de Israel. La sencillez matemática y potencia del método de FGS lo hace particularmente idóneo para abordar la interacción de ligandos inespecíficos con el ADN en casos más complejos a los arriba comentados.

El método de FGS se fundamenta en la utilización de un colectivo (conjunto de sistemas termodinámicamente equivalentes) en el que se permite variar el número de monómeros de la red, de forma que en el límite de redes infinitas la función de partición del sistema (suma de pesos estadísticos de los diferentes microestados del mismo) puede aproximarse a la potencia *N*-ésima de x_1, siendo *N* el número de monómeros de la red, y x_1 la raíz máxima de una ecuación específica del sistema (la "ecuación secular"). A partir de esta función de partición se evalúan diferentes magnitudes macroscópicas, tales como la fracción de ligando unido y la fracción helicoidal, así como sus fluctuaciones.

Otra de las técnicas experimentales típicas en el estudio de interacciones inespecíficas ADN-ligando son las curvas de transición térmica. Dicha técnica se basa en el hecho de que, a medida que el ADN aumenta la temperatura, su estructura en doble hélice se deshace en dos cadenas sencillas. Este tránsito se mide mediante espectrofotometría en el ultravioleta. La temperatura de fusión de un ADN se define como aquella a la cual la fracción doble helicoidal de ADN es de 0,5. Puesto que, al variar la temperatura, varía la relación ADN doble helicoidal/ADN de cadena sencilla, en presencia de un ligando (tanto si interacciona con una u otra especie) una curva de transición térmica en el fondo es una titulación del mismo con ADN.

Además, su aspecto (por tanto su temperatura de fusión) cambiará con respecto al del ADN en solitario. McGhee utilizó el método de FGS para la descripción de curvas de transición térmica de complejos inespecíficos ADN-ligando. Para dar cuenta de la transición de ADN doble helicoidal a ADN unicatenario, introdujo dos parámetros: una constante de nucleación, para la formación de un par de bases aislado, y una constante de elongación (con dependencia de tipo van't Hoff con la temperatura), para la formación de pares de bases contiguos a otros ya existentes (*figura c*). El equilibrio de asociación ADN-ligando se describe de forma similar que en el modelo de McGhee-von Hippel.

Nuestro grupo de biofísica de la Universidad Complutense de Madrid ha obtenido recientemente expresiones

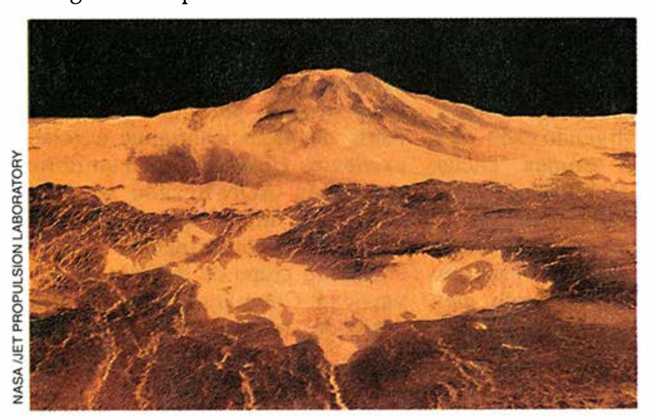
analíticas (derivadas a partir de la teoría de McGhee) que relacionan el valor de la constante de elongación en la temperatura de fusión con los parámetros K, n y ω que definen la interacción. De este modo, la estimación de dichos parámetros puede hacerse a partir de la información de la temperatura de fusión de tres o más curvas de transición térmica obtenidas en diferentes relaciones ADN/ligando.

Como se ha dicho anteriormente, el método de FGS permite describir sistemas de gran complejidad. Por ejemplo, se ha utilizado en las dos últimas décadas para estudiar la transición bidireccional de la forma Z a la B del ADN, inducida por la interacción de drogas intercalantes. (La configuración Z del ADN es la de una doble hélice levógira; la B, la de doble hélice dextrógira de Watson-Crick.) También se ha abordado la asociación de moléculas que interaccionan con el ADN de forma modulable alostéricamente por efectores presentes en el sistema, así como ligandos capaces de interaccionar de varias formas con el ADN.

El método de FGS ha sido mejorado por Yi-Der Chen, del Instituto Nacional de la Salud. Acaba de demostrar que tanto la ecuación secular

Tres caras de Venus

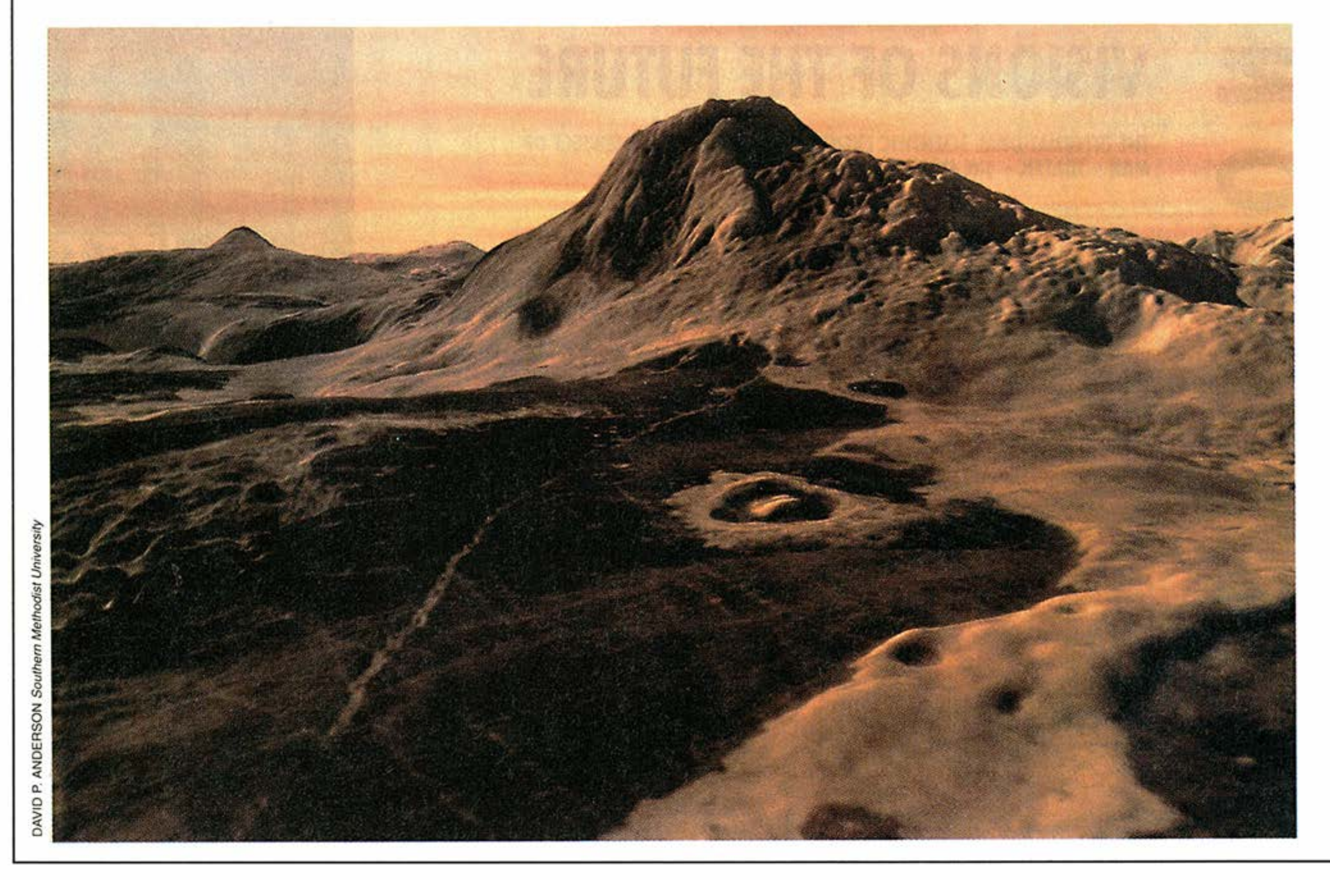
Siglos enteros ha permanecido oculta la superficie de Venus a los ojos de los astrónomos. Ya no es así. La sonda *Magallanes* empezó a girar alrededor de Venus en 1990. Desde entonces ha habido un abrumador flujo de imágenes del planeta.


NASA /JET PROPULSION LABORATORY

Cuando se complete, el mapa de Venus realizado por la *Magallanes* mediante radar contendrá aproximadamente tres billones de bits en datos, miles de veces la información almacenada en toda la *Enciclopedia Británica*. El Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena se encarga de publicar las imágenes oficiales de la NASA. Traducir ese tesoro de datos en forma de ecos de radar a imágenes intuitivamente comprensibles no les ha sido fácil.

Otros científicos han contribuido ahora a la tarea gracias a la amplia difusión de los datos y a la disponibilidad de potentes programas gráficos. Distintos criterios y énfasis producen imágenes distintas, como muestran estas tres imágenes.

La imagen, bien conocida ya, de la NASA (*superior izquierda*) presenta una vista del Mont Maat, volcán venusiano de cinco kilómetros de altura. El brillo representa el grado de reflexión del radar de la *Magallanes* por el terreno local, que depende de la aspereza de la superficie y de su inclinación. Para que la topografía apareciera claramente, se decuplicó el relieve e inclinó la


DAVID P. ANDERSON *Southern Methodist University*

como las distintas magnitudes medias pueden obtenerse por manipulación de un determinante característico del sistema, lo que reviste particular interés a la hora de computar numéricamente isotermas y curvas de transición térmica.

Hay, por último, ciertos ligandos inespecíficos cuya interacción con el ADN es superficial, electrostática y deslocalizada (por ejemplo, poliaminas y oligolisinas). En dichos casos no es posible modelar el ADN como una red, sino considerándolo un continuo unidimensional. En vez de ocupar posiciones fijas, los ligandos pueden desplazarse libremente en una dimensión (sin interpenetrarse). La correspondiente teoría mecanoestadística para estos ligandos fue desarrollada hace algunos años por Charles P. Woodbury Jr. Ultimamente, Jolly Ray y Gerald S. Manning la han generalizado para introducir los efectos de polielectrolito (dependencia con la fuerza iónica de las constantes cinéticas y de equilibrio en este tipo de macromoléculas altamente cargadas) en la interacción.

Podemos concluir que los trabajos iniciales de Lifson y otros autores en los años sesenta ha dado lugar a una muy fructífera rama (tanto en lo teó-

imagen para simular una vista en perspectiva. Más discutible es la coloración en naranja eléctrico, escogida para simular la apariencia de la superficie cuando se ilumina con la luz solar enrojecida que se filtra a través de la espesa atmósfera de Venus. Por supuesto, las imágenes de la *Magallanes* se obtienen mediante radar, no con luz visible, y el cielo completamente negro contradice la ilusoria sensación de color real.

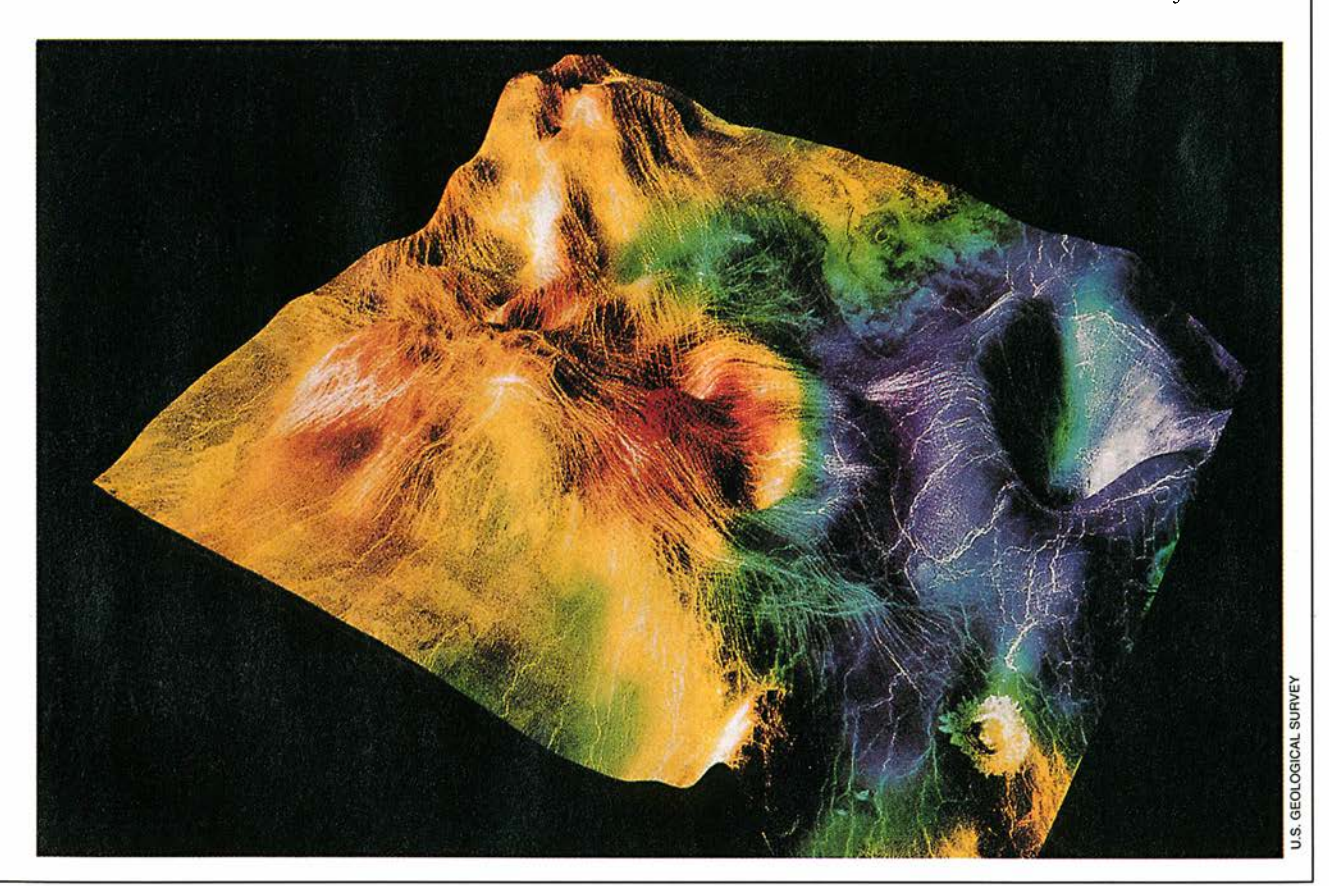
David P. Anderson, de la Universidad Metodista del Sur, ha producido una imagen más "terrestre" del Monte Maat a partir del mismo conjunto de datos (*inferior izquierda*). La diferencia más apreciable es la paleta de colores. Los tonos del suelo se basan en el color del basalto, clase de roca que se cree cubre la mayor parte de la superficie de Venus. Las nubes se introdujeron "principalmente por razones estéticas", explica, pero añade que proporcionan un fondo que realza el sentido de percepción de la profundidad. La forma de las nubes está basada en hipótesis plausibles sobre la apariencia del cielo del planeta.

Pero tales adornos son de importancia secundaria para Anderson; "la parte más difícil es obtener correctamente la topografía", dice. Mediante técnicas derivadas de la geometría fractal, Anderson ha obtenido una topografía que considera más realista que la que emerge de las imágenes de la NASA; un complejo programa de trazado de rayos le sirvió para dar al paisaje resultante una apariencia sólida y verosímil.

Dado que las imágenes de radar de Venus carecen de color, Randolph L. Kirk, Laurence A. Soderblom y Ella M. Lee, del Servicio de Inspección Geológica de los EE.UU., han empleado los matices cromáticos para representar la emisividad, o grado con el que las calientes rocas de la superficie de Venus emiten radiación en microondas (*abajo*). La emisividad es mínima para las rocas lisas que sean buenas conductoras de la electricidad. Aquí las rocas de emisividad mínima aparecen en violeta y las que la tienen máxima se han coloreado en rojo; los valores intermedios se mueven a lo largo del espectro visible.

Kirk y sus colaboradores acentuaron la topografía de la región volcánica llamada Fosas de Sigrun en un factor 100. Las distribuciones de emisividad pueden significar erosión o variaciones en la composición de las corrientes locales de lava, observa Soderblom. El grupo de Kirk optó por representar la emisividad mediante colores brillantes y saturados, que el ojo puede descifrar fácilmente.

Corey S. Powell


U.S. GEOLOGICAL SURVEY

rico como en lo experimental) de la biofísica, y de toda la biología molecular, que se plantea la descripción de sistemas inespecíficos ADN-ligando cada vez más complejos, sistemas fuera de equilibrio y metodologías para el estudio de los mismos. (G. Colmenarejo y F. Montero, del departamento de bioquímica y biología molecular I, de la Universidad Complutense de Madrid.)

Química plana

Láminas de polímeros con propiedades insólitas

La química de polímeros ha entrado en una nueva dimensión. La mayoría de los polímeros no son nada más que unidades moleculares idénticas, o monómeros, engarzados en cadenas unidimensionales. Pero ahora se ha logrado la constitución de láminas bidimensionales. Algunas de sus propiedades son insólitas. "Cabe la posibilidad de transformar todos los monómeros conocidos en objetos bidimensionales", afirma Samuel I. Stupp, jefe del equipo en la Universidad de Illinois que ha conseguido la síntesis de láminas de polímeros. "Si esta posibilidad se convirtiese en realidad, tendríamos un nuevo conjunto de materiales, con nuevas propiedades".

Stupp ya ha demostrado que las láminas de polímeros destacan por su flexibilidad, resistencia y duración. Podrían servir como lubricantes, semiconductores, materiales ópticos o membranas selectivas.

Los polímeros en láminas de Stupp están entre las mayores moléculas jamás sintetizadas; se les ha dado el nombre de "gigamoléculas". La masa de un polímero se mide normalmente en daltons. Un átomo de carbono tiene una masa de 12 daltons. La amilopectina, uno de los mayores polímeros que se conocen y principal componente de los almidones, pesa 90 millones de daltons. Stupp estima que sus moléculas pesan mucho más de 10 millones de daltons, y afirma que "las de mayor tamaño que vemos por microscopía electrónica están más allá de la resolución de peso molecular de nuestros instrumentos".

Para fabricar las láminas de polímeros, Stupp, según él mismo ha explicado en la revista *Science*, prepara en primer lugar una molécula precursora mediante 21 reacciones químicas diferentes. El resultado es una molécula en forma de varilla con dos sitios reactivos: uno en el centro de la molécula y el otro en un extremo.

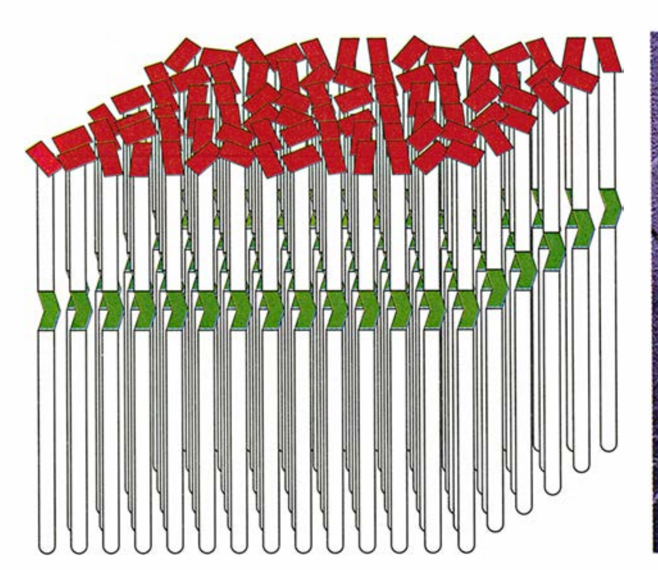
Quizá se entienda mejor cómo se ensamblan estos precursores si los comparamos con lápices afilados. El borrador del lápiz corresponde al extremo reactivo; la marca que va estampada en el lápiz, al sitio reactivo central. La "marca" determina que los lápices se alineen costado con costado, en la misma dirección. Por tanto, los lápices forman una capa con los borradores en un lado y las puntas en el otro.

Una segunda capa se crea simultáneamente encima de la primera, de suerte tal que los borradores de una capa se tocan con los de la otra. Uno de los hallazgos más importantes de Stupp fue el del método de imbricación de esas capas. Cuando se les aplica calor, se forman enlaces entre los borradores y las marcas, y así se establecen uniones dentro de las dos capas y entre ellas. De ese modo Stupp construye láminas cuya área es normalmente de una micra cuadrada, y su espesor uniforme de 0,005 micras. "La gracia de nuestro método estriba en que tenemos cierto control sobre el tamaño", puntualiza Stupp. "Podemos fabricar láminas muy pequeñas o muy grandes".

En los últimos años se habían construido ya, en Harvard y en otros laboratorios, estructuras moleculares bidimensionales ligadas a láminas de oro o que descansaban sobre la superficie de líquidos. "El mayor problema de esos otros intentos fue la poca estabilidad de la estructura", comenta Thomas. Hasta ahora, Stupp es el único que ha tenido éxito en la fabricación de láminas de polímeros robustas y con libertad de movimiento.

Stupp es consciente de que ni él ni ningún otro químico tienen derecho a alardear demasiado de la creación de los polímeros bidimensionales, pues en la naturaleza los hay desde hace mucho. La membrana de los eritrocitos, por ejemplo, contiene un gel proteínico que es una especie de polímero bidimensional. Se cree que el gel hace las veces de esqueleto flexible de las células, y desempeña un papel en que pueden cambiar de forma.

Cuando las láminas son expuestas al calor o se colocan en un medio ambiente ácido, tienden a enrollarse como una hoja de tabaco alrededor





Laminas de polimeros fabricadas a partir de precursores (izquierda) *en forma de varilla y con dos sitios reactivos (*rojo y verde*). Una gigamolécula simple puede pesar más de 10 millones de daltons y tener una longitud de unas pocas micras, como se muestra en la microfotografía electrónica* (derecha)

de un puro. Se podrían envolver distintas sustancias dentro del polímero, lo que quizá sirviese para la administración de fármacos. O podrían construirse membranas selectivas que sólo permitieran el paso de ciertas moléculas. "Si supiese qué otras aplicaciones son posibles," dice Thomas, "ahora mismo me pondría a escribir un artículo sobre ellas."

Ordenadores agonizantes

Redes neuronales en el umbral de la muerte

¿Qué hace un ordenador cuando agoniza? HAL 9000, la computadora de *2001: Odisea del espacio*, se puso a cantar "Una bicicleta para dos", canción que había aprendido en sus primeros días. Esta memorable escena podría no ser tan irreal como en principio parece. Stephen L. Thaler, físico de la McDonnell Douglas, ha descubierto que esa vuelta a lo aprendido en una fase temprana es lo que realmente le ocurre a una red neuronal artificial cuando poco a poco se la va "matando". A medida que se acerca a la muerte, empieza a emitir, no incoherencias, sino información aprendida con anterioridad; por así decirlo, su vida de silicio pasa como un destello ante sus ojos.

Es imposible que esto no nos recuerde las llamadas experiencias en el umbral de la muerte; al fin y al cabo, los creadores de redes neuronales pretenden al diseñarlas remedar la estructura y función de un cerebro biológico. Una red neuronal es un tipo especial de programa que se articula mediante "unidades" que imitan el papel del soma de las neuronas y "enlaces" que actúan a modo de los axones y dendritas que las interconectan. En una disposición típica, las unidades están organizadas en varios estratos o niveles. Consecuencia de tal arquitectura es que la red, como el cerebro, es capaz de aprender. Se cree que en un cerebro real el aprendizaje se produce por modificaciones de la intensidad de las conexiones sinápticas entre neuronas. De igual manera, una red neuronal va modificando la fuerza de los enlaces (específicamente, el "peso" de las conexiones entre unidades) a fin de producir salidas correctas. Normalmente, el programador instruye a la red presentándole, repetidas veces, series de configuraciones de instrucción.

Redes neuronales instruidas pueden tomar a su cargo multitud de tareas, desde la compresión de datos hasta la modelización de la dislexia. Thaler empezó, hará un año, a investigar las redes neuronales en busca de un procedimiento de optimización del control de crecimiento de los cristales de diamante. Pero por curiosidad, para matar el tiempo libre, se puso a ver qué pasaba cuando se aniquilaba una red neuronal. Preparó a tal fin un programa que fuera destruyendo la red gradualmente, cortando al azar las conexiones entre unidades. "Se trataba de imitar la despolarización de las sinapsis en los sistemas biológicos", explica Thaler. Tras cada paso, Thaler examinaba la salida de la red.

Cuando se destruían entre el 10 y 60 por ciento de las conexiones, la red escupía un galimatías sin sentido. Pero cuando el número de conexiones destruidas se acercaba al 90 por ciento, la salida empezaba a estabilizarse en valores bien caracterizados. En el caso de la red de ocho unidades de Thaler, creada para materializar la función lógica "O exclusiva", gran parte de lo producido

eran los estados 0 y 1 para los que estaba instruida. La red generaba a veces lo que Thaler denomina "estados caprichosos", esto es, valores que ni correspondían a los aprendidos por la red ni aparecerían tampoco en una red "sana". Las redes no instruidas, por el contrario, sólo producían al morir números aleatorios.

No es tan descabellado que las exhalaciones de una red moribunda tengan sentido. "Es comprensible, habida cuenta de que son redes que han creado pautas estables," opina David C. Plaut, psicólogo e informático en la Universidad Carnegie-Mellon que se vale de redes neuronales para remedar lesiones cerebrales. De hecho, el propio Thaler ha proporcionado una explicación detallada del fenómeno. En una red plenamente instruida y en servicio, todas las señales ponderadas que ingresan en una determinada unidad son más o menos de la misma magnitud y de signos opuestos. (En jerga matemática, los pesos tienen una distribución gaussiana, de perfil en forma de campana). Es probable, pues, que la suma de las diversas señales que llegan a una unidad sea casi igual a cero. Por tanto, si se cortan los enlaces, la unidad quizá no "sienta" la pérdida; al fin y al cabo, podría haber estado recibiendo anteriormente de ellos una señal total nula. Con frecuencia, los pocos enlaces que sobrevivan bastarán para que se produzca una salida razonablemente coherente.

Pero trasladar las consecuencias de esta experiencia artificial a las vivencias que los seres humanos tienen cuando están a punto de morir es exagerar demasiado. "Las redes neuronales no pasan de ser una burda aproximación en el mejor de los casos," señala Plaut. El cerebro es muchísimo más complejo que las redes neuronales. Además, no está del todo clara la forma en que mueren las neuronas cuando están agrupadas. La muerte de unas cuantas, por ejemplo, quizás arrastre a la muerte a sus vecinas. Y el método que se utiliza en la instrucción de las redes neuronales —un algoritmo de retropropagación— no guarda parecido con la manera en que el cerebro aprende.

Aun así, la observación sugiere que algunas de las experiencias cuasimortales de las que con frecuencia se habla pudieran tener un fundamento matemático. "Quizá no se trate de pura bioquímica-ficción," afirma Thaler, quien en estos momentos trabaja con redes más complejas, entre ellas una que producirá imágenes visuales. ¿Apuesta alguien por una luz que brilla al extremo de un largo túnel?

Pólenes y lagos

La reconstrucción del clima del pasado

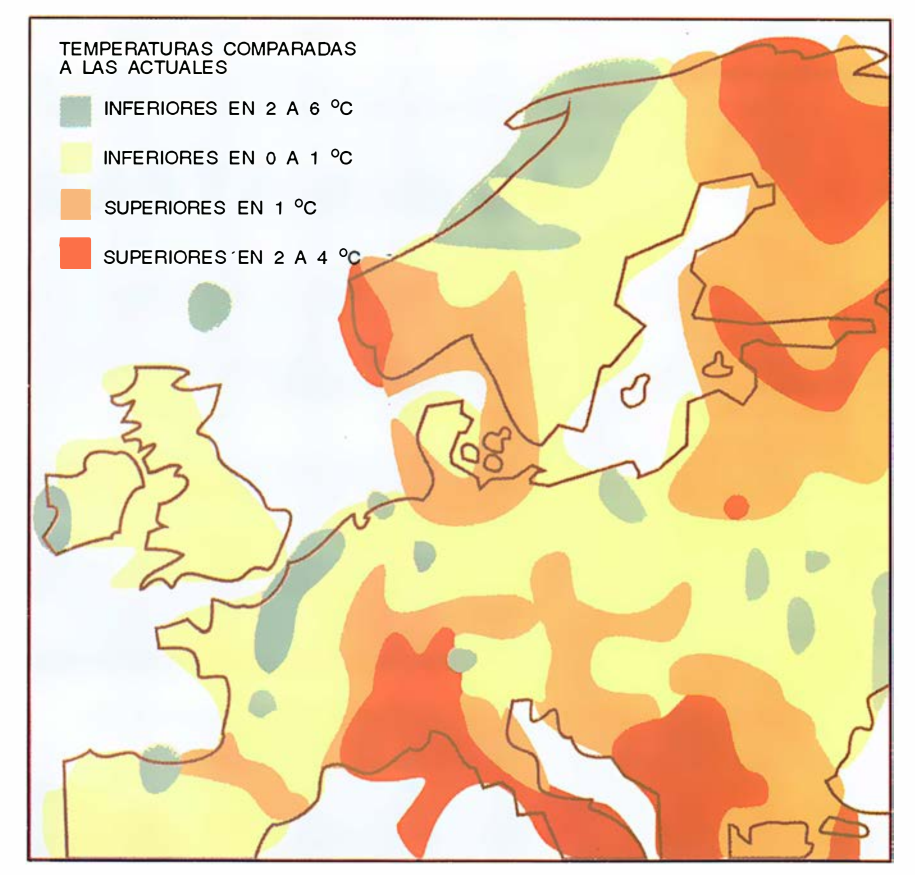
No existe variación climática, se haya extendido a lo largo de siglos o de varios millones de años, que no haya modelado nuestro ambiente. La alternancia de los períodos glaciales e interglaciales se debe principalmente a las variaciones en la cantidad de calor solar que caldea la Tierra.

Estos grandes cambios han dejado sus huellas en los restos fósiles, los glaciares y la vegetación. Cada año, los granos de polen dispersados por las plantas se acumulan en los sedimentos; estos granos, cuya cubierta es muy resistente, se conservan en los ambientes húmedos desprovistos de oxígeno. Al estudiarlos, los paleobotánicos siguen la evolución de la vegetación a lo largo de varios millones de años.

Como sea que las características morfológicas de los granos de polen fósiles se parecen a las de los granos de polen contemporáneos, nos faculta para determinar, en razón de su forma, la planta de la que proceden, de la que nos hacen saber a veces su especie, más a menudo su género.

Con el fin de recoger estas informaciones, se toman muestras a intervalos regulares de un testigo extraído de los sedimentos; mediante tratamientos químicos adecuados se elimina la ganga y después se observa la muestra al microscopio. En cada muestra se enumeran las especies o géneros reconocidos, y se determina así un espectro polínico característico de la vegetación de la que procede. El conjunto de espectros de las muestras sedimentarias proporciona el diagrama polínico característico del testigo. Toda modificación del diagrama indica un cambio de la vegetación pasada, generalmente como resultado de una modificación del clima. En la actualidad conseguimos deducir por medios estadísticos el clima que reinaba en una época determinada a partir de la composición polínica de los testigos sedimentarios que estudiamos.

Los espectros polínicos se datan según la capa sedimentaria de la que proceden los granos de polen (mediante el método del carbono 14).



Hace 6000 años, las temperaturas medias eran superiores a las actuales. En el noroeste de España y en muchos países de la cuenca mediterránea, las temperaturas eran superiores, entre 1 y 6 °C, a las actuales. Por el contrario, en Europa central, las temperaturas eran de 1 a 2 °C inferiores

Una vez hecho, se comparan los espectros del diagrama polínico con espectros de referencia contemporáneos (de los que se conocen, evidentemente, las condiciones climáticas). Por desgracia, un espectro polínico del pasado es a menudo afín a varios espectros actuales. Las analogías polínicas se precisan entonces mediante otros indicios paleoclimáticos, como los restos fósiles de coleópteros o las variaciones del nivel de los lagos.

De esta manera hemos demostrado que en dos períodos cálidos (hace 125.000 y 6000 años) la temperatura media era superior en uno a dos grados a las temperaturas medias actuales, y que durante el largo período frío que culminó hace 20.000 años, en Francia la temperatura era inferior a la actual en unos cinco grados.

Hemos reconstruido, con datos polínicos extraídos de más de 200 testigos europeos y a partir de muestreos efectuados en 82 lagos de Europa, mapas térmicos y pluviométricos anuales de hace aproximadamente 9000, 6000 y 3000 años. Hace 6000 años, el clima era por término medio más cálido que hoy en día, del orden de uno a tres grados.

Las partes occidental y meridional de Europa eran más áridas, y la septentrional y la oriental, más húmedas. La insolación anual a latitudes altas era superior, y en las latitudes medias el contraste entre el invierno y el verano, muy marcado. El anticiclón subtropical, que rige el clima de Europa, se debió de desplazar hacia el norte, Europa septentrional se caldeó y las precipitaciones aumentaron en Escandinavia.

Los datos paleoclimáticos que suministra el análisis del polen y los procedentes del nivel de los lagos no siempre coinciden. Así, durante el último máximo glacial, hace unos 18.000 años, la vegetación, según los datos polínicos, habría sido esteparia en el norte de Grecia; sin embargo, los niveles de los lagos de esta región eran al menos tan elevados como en la actualidad, si hay que hacer caso de los análisis geomorfológicos.

Tal contradicción es sólo aparente: hemos imaginado distintas situaciones climáticas hipotéticas (clima más frío, o más seco o más nublado en verano, más frío o más húmedo en invierno, y combinaciones de estas condiciones diversas), y hemos calculado el efecto de estas condiciones sobre el nivel de los lagos y sobre la vegetación. Hemos demostrado que la distribución estacional de las lluvias desempeña un papel más importante que el total de las precipitaciones: para precipitaciones totales anuales constantes, basta que el 10 por ciento del total anual caiga de más durante los meses de invierno en detrimento de los meses de verano, para que el bosque mediterráneo deje paso a una estepa y para que las aguas de escorrentía aumenten en un 20 por ciento. Las precipitaciones aumentan en invierno, pero el suelo ya está saturado de agua, y ese aporte no compensa el déficit hídrico de la estación de crecimiento. Estepas de este tipo ya no existen en Europa, sino sólo en América del Norte, en latitudes comparables, al este de las montañas Rocosas.

Además de las informaciones que estos datos paleoclimáticos aportan acerca de los climas pasados, también nos instruyen sobre el clima del siglo XXI. Hoy se sabe que la entrada en la atmósfera de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono o el metano, plantea el riesgo de perturbar notablemente el clima. Si bien los climatólogos se basan en los modelos de circulación atmosférica y oceánica, la paleoclimatología permite someter a prueba esos modelos en condiciones climáticas extremas y comprobar las consecuencias pasadas de una modificación del clima global del orden de varios grados.

Los modelos nos enseñan que, si la concentración de dióxido de carbono se duplicara, las temperaturas invernales aumentarían, en Europa, de tres a diez grados. Además, por encima del paralelo 40, las precipitaciones abundarían más. El verano sería igualmente más caluroso, del orden de tres grados, y las precipitaciones disminuirían al sur de los 50º de latitud Norte.

Esto es, a mayor escala, lo que, por ejemplo, conoció Italia hace 6000 años; pero, diferencia notable, este tipo de clima se estableció entonces de manera natural y a lo largo de varios milenios. La vegetación era esencialmente forestal en la mayor parte de Europa, pero nuestro modelo demuestra que basta con aumentar en la región meditarránea el déficit hídrico estival del orden de 100 milímetros por año para que la vegetación forestal sufra una regresión notable.

Estamos elaborando un banco de datos polínicos, a fin de reconstituir la vegetación y el clima del planeta durante los períodos clave del pasado. Estas informaciones contribuirán a mejorar los modelos climáticos con los que se prevé el clima del mañana. Joël Guiot (Laboratorio de botánica histórica y de palinología, CNRS).

De cerca

Fotos y texto: Satoshi Kuribayashi

Polen de katenso



La botánica, dicen sus cultivadores, es *scientia amabilis* por antonomasia. No ando yo muy seguro de ello a tenor de lo que leemos en los libros que cuentan su historia. Pero las plantas, ajenas a las controversias de sus observadores, sí tienen siempre un lado escondido cuya belleza aguarda a quien quiera descubrirla. Hasta las llamadas malas hierbas. Hay, en mi país, una de éstas, aparentemente anodina y de flores minúsculas, que pasaría inadvertida si no fuera por su polen característico.

Esas herbáceas crecen en colonias. Prefieren los lugares umbríos de valles y faldas de montaña. Llegada la época de floración, sus verdes hojas oliváceas se cubren de un manto blanco. Miradas de cerca, algunas exhuman una fumarola tenue. Se trata del polen, emitido con energía por la humilde katenso. Al profano no le resulta fácil averiguar de dónde sale.

Creé un pequeño parterre en mi laboratorio. Y elegí las flores masculinas con las anteras a punto de estallar. Preparé a su lado el sensor del disparador automático. Con paciencia benedictina gasté hasta diez carretes de película en la semana de trabajo que me llevó conseguir la fotografía que el lector puede ahora disfrutar.

distancia focal: 80 mm
diafragma: F = 22
exposición: 1/22.000 de segundo
película: ISO = 50



La quitina

El segundo compuesto orgánico más abundante en la Tierra es un polisacárido lineal que imparte rigidez a la pared celular de los hongos y al exoesqueleto de un gran número de invertebrados

José Ruiz-Herrera

La quitina es el compuesto orgánico que abunda más en el planeta después de la celulosa, otro polisacárido. Henry Braconot la descubrió en 1811 en algunas setas y E. Odier la redescubrió en 1823. El segundo le dio su nombre actual de "chitine", quitina, cuya etimología griega evoca el significado de túnica, porque la encontró en los élitros de algunos escarabajos y supuso que cumplía una función protectora de los tejidos animales.

La verdad es que la celulosa y la quitina cumplen misiones semejantes de protección y resistencia en plantas y algas, la primera, y en animales inferiores y hongos, la segunda. A tenor de esa distribución selectiva de ambos polisacáridos, alguien podría concluir que, desde el punto de vista evolutivo, los hongos están más ligados a los animales que a las plantas. Pero dentro de los hongos distinguimos dos grandes grupos, los hongos inferiores, que portan celulosa, y los superiores, que poseen quitina. Por cuya razón se habla de un origen polifilético de ese reino orgánico.

La quitina, más versátil que la celulosa, es un polisacárido formado por el azúcar N-acetilglucosamina (abreviado GlcNAc), que se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza. Quitina y celulosa están constituidas por largas cadenas de monómeros de azúcar unidos covalentemente por enlaces de tipo *B* 1-4 (posiciones de los átomos de carbono), topología que les dota de cierta rigidez. Las cadenas, a su vez, se unen entre sí por medio de puentes de hidrógeno para formar microfibrillas; estructuras muy pequeñas cuya asociación origina fibras mayores, algunas de las cuales las percibe el ojo humano desnudo, por ejemplo, las fibras celulósicas de algodón. Celulosa y quitina forman auténticos tejidos que confieren resistencia y soporte a los organismos. Lo mismo que los huesos de los vertebrados, la quitina establece complejos con las proteínas y se calcifica para constituir el esqueleto externo (exoesqueleto) de muchos invertebrados.

JOSE RUIZ-HERRERA es profesor de los departamentos de ingeniería genética y biología molecular del Instituto Politécnico Nacional de México. Se doctoró en microbiología por la Universidad de Rutgers y ha presidido la Sociedad Mexicana de Microbiología. Su interés investigador se centra en el estudio de la estructura y síntesis de la pared celular de los hongos, así como en la diferenciación y desarrollo de tales organismos.

Celulosa y quitina cristalizan en distintas figuras, según la disposición de las cadenas del polisacárido. En efecto, la molécula de azúcar adopta, podemos aceptarlo, la forma de un hexágono irregular con dos extremos: uno correspondiente al átomo de carbono número 1, que posee una función aldehído, reductora, y otro correspondiente al átomo número 4 con una función alcohol, que no es reductora. Al unirse dos moléculas de GlcNac (o de glucosa en el caso de la celulosa) establecen la llamada unión glicosídica entre los átomos de carbono número 1 de un monómero y el número 4 del monómero vecino.

En una cadena habrá, pues, dos extremos distintos, uno en el que la última molécula de azúcar posea el extremo reductor libre y el otro en el que la molécula tenga libre el extremo no reductor. Al establecer uniones por puentes de hidrógeno, las distintas cadenas que originan la microfibrilla actúan de acuerdo con reglas estrictas para dar una estructura cristalina. En la celulosa nativa, las cadenas se organizan paralelamente; todas ellas se hallan orientadas con los grupos reductores libres en un extremo y los grupos no reductores en el opuesto.

El caso de la quitina es distinto, ya que hay tres formas naturales del polisacárido: alfa, beta y gamma. En la forma alfa, la más abundante, las cadenas son antiparalelas (como en la molécula de ADN), es decir, cada cadena dispuesta en un sentido se asocia con otra orientada en sentido contrario. La beta quitina tiene las cadenas paralelas (como la celulosa nativa). La gamma quitina, la más rara de las tres formas, presenta, por cada cadena dispuesta en un sentido, dos que se orientan en sentido opuesto. El análisis por difracción de rayos X distingue nítidamente las tres formas, ya que difieren en razón de su estructura cristalina.

No se conocen las razones por las que la quitina puede cristalizar, en condiciones naturales, en tres formas distintas, pero el fenómeno comporta varias consecuencias. En primer lugar, las tres tienen propiedades distintas que les permiten acometer funciones diferentes; así la forma alfa es la más rígida y cumple funciones esqueléticas, en tanto que las otras dos, capaces de hidratarse, desarrollan unas propiedades mecánicas semejantes a las del cartílago. Por otro lado, el hecho de que las cadenas de la forma alfa sean antiparalelas indica que los procesos de síntesis y ensamblaje de las cadenas para crear las microfibrillas no pueden ser simultáneos en el tiempo, sino separados.

La quitina constituye el polisacárido más insoluble que existe, lo que explica la dificultad que entraña determinar el tamaño de sus cadenas poliméricas. Para lograr tal medición nos servimos de un método indirecto. Empezamos por sintetizar quitina *in vitro* a partir de GlcNAc marcado radiactivamente con tritio. El polisacárido precursor se usó como substrato para la acción de la galactosiltransferasa; esta enzima añade una sola molécula de galactosa al extremo no reductor de las cadenas de quitina. La galactosa usada para ello

estaba marcada radiactivamente con carbono 14. La proporción de radiactividad que habían adquirido las moléculas de azúcar nos daba la actividad específica del polisacárido y, conocida dicha actividad y la relación de ^{3}H a ^{14}C, pudimos calcular que las moléculas de quitina tenían unas 2000 unidades de GlcNAc.

La quitina se encuentra en toda la escala de los seres. Las bacterias, empero, carecen de ella. Entre los protozoos, muchos ciliados utilizan la quitina para construir estructuras protectoras (lórigas) a semejanza de los corales; múltiples amebas, todas las parasitarias de animales, forman quistes de quitina. Este polisacárido lo hallamos en las colonias de hidrozoos, es un componente estructural de anélidos y moluscos, abunda menos en nemátodos y celenterados, pero crea el exoesqueleto de los artrópodos. Vuelve a faltar la quitina en equinodermos y cordados, indicio de que se produce un cambio brusco en la estrategia evolutiva de los animales.

Entre las algas, poseen quitina las diatomeas y los crisoflagelados. En los hongos, con excepción de los oomicetos, ese polisacárido se erige en el principal compuesto del armazón de la pared celular. Como es sabido, la pared celular es la estructura externa que confiere protección, rigidez y forma a estos organismos. Las plantas superiores carecen de quitina.

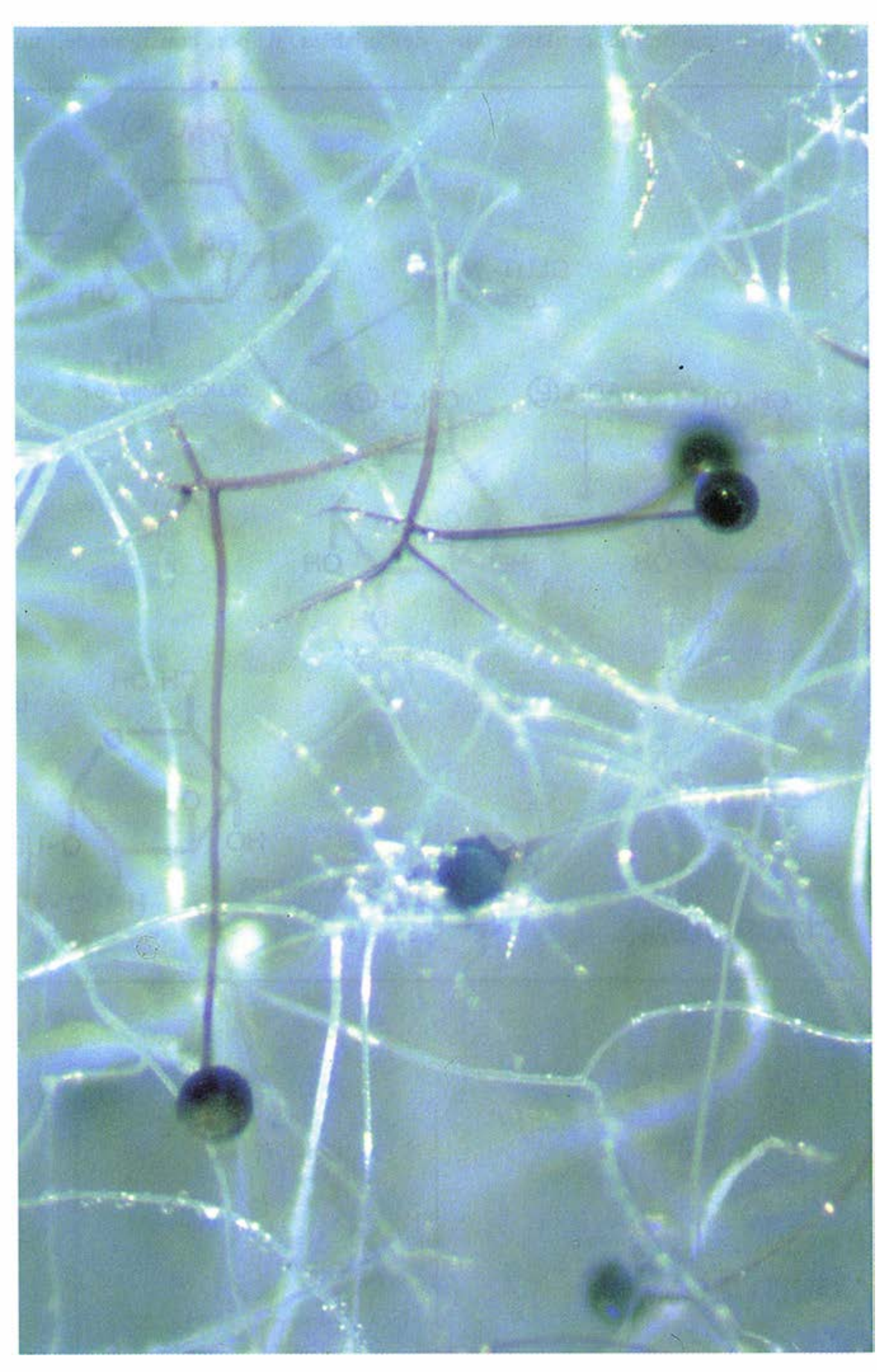
En la estrategia por la supervivencia, llama la atención que plantas y animales superiores estén privados de quitina en tanto que sí la poseen sus múltiples parásitos. Los hongos constituyen las peores plagas de la agricultura, y los insectos son vectores de otras más. Hongos e insectos destruyen una proporción muy grande de los granos almacenados, y algunos hongos producen toxinas que hacen sumamente peligroso el consumo de estos granos infestados. En los animales superiores, hombre incluido, los hongos, amebas, ácaros e insectos causan enfermedades o las transmiten.

Ese panorama sugiere que el diseño de drogas que inhiban la formación de quitina constituye el método ideal de combate de esos parásitos, ya que serían altamente específicas contra ellos. Recuérdese a este propósito el caso de la penicilina y sus derivados, cuya acción bacteriana selectiva se debe a que inhiben la formación de un compuesto exclusivo de la pared celular de las bacterias (la peptidoglicana), y del que carecen por tanto los eucariotas.

Hasta el momento se conocen dos familias de antibióticos que constituyen las "penicilinas de los hongos": las polioxinas y las nikomicinas. Producidas ambas familias por actinomicetos aislados del suelo, actúan inhibiendo la enzima que sintetiza la quitina; para ello se valen de un mecanismo competitivo, al presentar análogos estructurales al substrato sobre el que opera la quitina sintetasa.

Los antibióticos de ambas familias atacan la inmensa mayoría de los hongos quitinosos. Su uso viene limitado por la relación beneficio/coste y por los problemas que plantean; en particular, la baja permeabilidad de las polioxinas contra las micosis humanas, que implica la necesidad de emplear altas dosis, su pobre absorción intestinal y su poca estabilidad química.

Con la importancia terapéutica he-



1. UNA PARTE CONSIDERABLE DEL MUNDO ORGANICO posee el polisacárido quitina. Muchos ciliados la utilizan para construir lórigas o estructuras protectoras, a semejanza de los corales; las amebas parasitarias forman quistes de quitina. La vemos en las colonias de hidrozoos y en los anélidos y moluscos. Teje el exoesqueleto de los insectos. En los hongos la quitina es el componente fibrilar de la pared; la ilustración superior lo ejemplifica en el moho negro (*Rhizopus nigricans*), del que vemos su micelio (filamentos blancos), esporangióforos (filamentos negros) y esporangios. (Fotografía cedida por Jaume Llistosella, de la Universidad de Barcelona.)

mos de destacar el interés industrial, tanto de la quitina como de la quitosana. Esta última existe en cantidades significativas sólo en la pared celular de los zigomicetos y es un polisacárido homólogo de la quitina, pero total o parcialmente desacetilado; se halla constituido fundamentalmente por glucosamina, en vez de acetil-glucosamina. La quitosana se forma *in vivo* por desacetilación enzimática de la quitina. Químicamente, la quitina puede desacetilarse por tratamiento con álcalis en caliente. El potencial anual de producción de quitina se ha calculado en 150.000 toneladas provenientes de residuos de las industrias de fermentación que emplean hongos (32.000 toneladas) y el resto de la industria pesquera.

Por sus características químicas y físicas, la quitina y la quitosana pueden substituir a materiales plásticos con la ventaja de que son biodegradables y, por consiguiente, no contaminan. Se investiga su aplicación como reactivos químicos para el análisis de metales, basándose en su capacidad de intercambiadores iónicos y de formar complejos, su aprovechamiento en cosmetología por sus propiedades emulsificantes y nula alerginicidad y su mayor explotación en la industria alimentaria y otras.

Quitina y quitosana se emplean ya en la industria alimentaria como fuente de fibra natural en la dieta, para fijar pigmentos artificiales y

2. BIOSINTESIS DE QUITINA, polisacárido constituido por monómenos de acetil-glucosamina. Hay tres formas naturales de quitina: alfa, beta y gamma. En la forma alfa, las cadenas son antiparalelas (como en el ADN); la beta tiene las cadenas paralelas, y la gamma quitina presenta, por cada cadena dispuesta en un sentido, dos que se orientan en sentido opuesto.

evitar su absorción en el intestino, como emulsificantes y para absorber grasas. En forma de película, se ha empleado la quitosana para purificar el agua por medio de ósmosis revertida y se ha sugerido su uso para proteger alimentos, ya que tolera altas temperaturas y es ella misma comestible. La quitosana sirve también para concentrar material proteico presente en líquidos de desecho de diversas industrias. Presenta esto una doble ventaja: el material concentrado se puede usar como aditivo en la alimentación animal y, en segundo lugar, purifica el líquido que puede verterse al medio ambiente. Por su propiedad floculante, el polisacárido puede depurar el agua potable de consumo humano.

En el ámbito médico de la quitosana se destacan sus propiedades hipocolesterémicas e hipolipidémicas, amén de constituir un poderoso secuestrante de pigmentos biliares. La quitosana es hemostática y varios derivados suyos presentan capacidad anticoagulante. La quitina es un adyuvante y activador de macrófagos que promueve la producción de anticuerpos. Ambas, quitina y quitosana, incrementan la defensa antitumoral y protegen contra diversos patógenos. En cirugía, el hilo de derivados de la quitosana aventaja al formado por otros materiales. El dominio de las aplicaciones se abre a la producción de textiles y membranas, recuperación y separación de metales, catálisis, purificación de enzimas y otros.



3. QUITINA ACUMULADA en el interior celular de *Mucor rouxii*. La célula se permeabilizó con tolueno-etanol y se incubó con UDPGlcNAc marcada con tritio y con tripsina para activar la quitina sintetasa. Después de incubadas, las células se procesaron para microscopía electrónica. Los granos esféricos de plata corresponden a la quitina sintetizada. Nótese que se hallan acumulados en el interior de la célula.

Nosotros hemos centrado la investigación en el papel de la quitina en el desarrollo de los hongos y su mecanismo de síntesis. Para cumplir con su cometido, la pared celular (la quitina es su principal componente) posee características mecánicas muy definidas, cuyo símil artificial son los materiales compuestos ("composites"). Estos materiales constan de una matriz y un elemento fibrilar rígido y fuerte, que posee una alta relación entre su módulo elástico y su densidad. Ese elemento fibrilar es responsable de la resistencia a las tensiones, en tanto que la matriz, débil y dúctil, constituye la zona a través de la cual se transfiere la tensión, soporta las presiones y protege las fibras del daño mecánico y las fracturas. En el caso de la pared celular de los hongos, la quitina cumple con el papel de elemento fibrilar estructural. La fuerza tensil de la quitina, muy superior a la de cualquier material natural, está por encima de la que posee la fibra de carbono o el mismo acero.

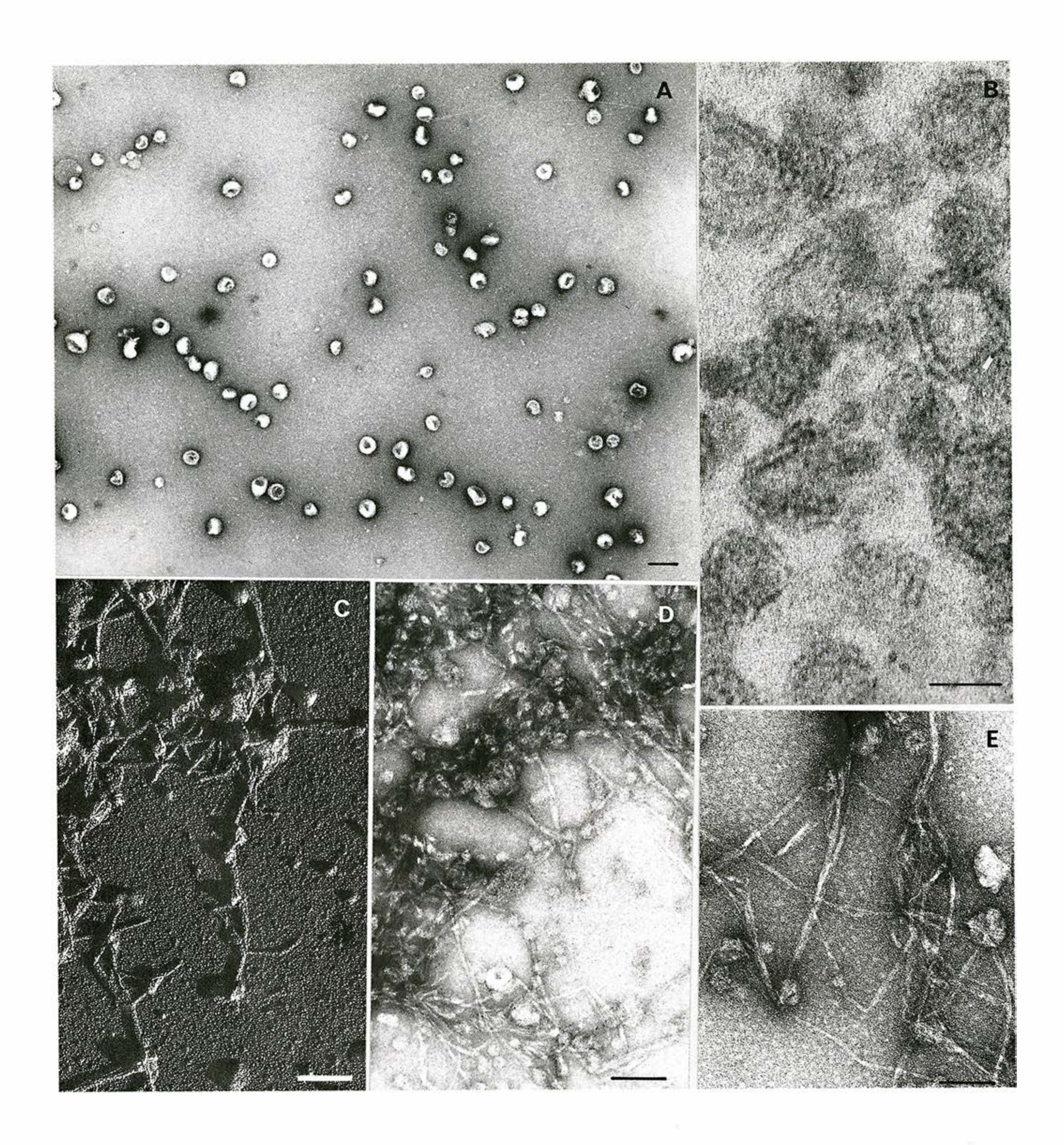
Si despojamos de la matriz a la pared celular permanecerá la quitina, resistente a la ebullición en ácido y álcali, y su malla conservará la forma del organismo. Ese papel morfogenético de la quitina se aprecia, por ejemplo, en la forma de los hongos. La pared celular del micelio de los hongos semeja un extenso sistema tubular por el que avanza protegido el citoplasma para su dispersión y búsqueda de nutrientes. De ahí el gran éxito colonizador de los hongos, cuyas estructuras de reproducción, las esporas, se forman sobre soportes que abandonan el substrato, para ser dispersadas al aire o ser arrastradas por cursos de agua. Al encontrar un huésped adecuado, los hongos forman, gracias a la quitina, estructuras especializadas de contacto y penetración.

La morfología del hongo tiene mucho que ver con la síntesis de la quitina, como demostró Salomón Bartnicki-García, de la Universidad de California en Riverside. Los hongos esféricos sintetizan quitina en toda su superficie (crecimiento isodiamétrico), en tanto que el micelio, tubular, deposita la quitina específicamente en la punta o ápice del mismo.

La biosíntesis de la quitina constituye un ejemplo de una reacción de transglicosilación, en la cual un donador de grupos glicosilo transfiere un glicosilo a un aceptor; el aceptor es la cadena de quitina, que se incrementa en una unidad, y el donador es un nucleótido. El sustrato sobre el que opera la enzima quitina sintetasa para producir ese polisacárido es la uridina-difosfato-GlcNAc, abreviadamente UDPGlcNAc.

La iniciación de la síntesis plantea ya un problema. ¿Cuál es el aceptor de la primera molécula de azúcar? No se sabe con certeza. Se ha hablado de lípidos y proteínas. A propósito de las segundas se recuerda que varios polisacáridos —así, las mananas de la pared de hongos y levaduras, el almidón, el glucógeno y las glucanas de los hongos— utilizan aceptores proteicos. Pero la mayoría de los autores se inclinan por pensar que no existiría aquí tal aceptor previo.

La estructura de la quitina con uniones de tipo B implica que la



4. QUITOSOMAS Y MICROFIBRILLAS DE QUITINA. Los quitosomas son microvesículas presentes en el citoplasma de los hongos quitinosos, cuya función es transportar quitina sintetasa a los sitios de la superficie celular donde ocurre la síntesis de la pared. Los quitosomas pueden purificarse a partir de extractos celulares: se eliminan primero los restos de la pared celular y las membranas, por centrifugación a alta y baja velocidad respectivamente; el sobrenadante se centrifuga en soluciones de sacarosa, donde los quitosomas se separan en razón de su tamaño y densidad específica. Cuando los quitosomas se incuban con activadores y con el sustrato (UDPGlcNAc) son capaces de formar microfibrillas visibles con el microscopio electrónico. La fotografía superior izquierda muestra los quitosomas esferoidales, teñidos negativamente con uranilo; al ser cortados, los quitosomas aparecen como cuerpos esféricos rodeados por una delgada membrana en la cual se halla embebida la quitina sintetasa (*fotografía superior derecha*). El interior no se tiñe, y no contiene elementos indispensables para la síntesis del polisacárido. En las dos primeras fotografías inferiores aparecen los quitosomas como cuerpos esferoidales asociados a las microfibrillas de quitina que han sintetizado al ser incubados con activadores y sustrato. Las microfibrillas aparecen unidas por uno de sus extremos a los quitosomas. En un caso, la muestra se sombreó con paladio, y en el otro se tiñó negativamente con uranilo. Al producirse la síntesis de quitina en el interior de los quitosomas, ésta puede cristalizar en forma de ovillos que hemos denominado "fibroides". Al romperse la membrana del quitosoma, el polisacárido quitina cristaliza en forma de microfibrillas rectas.

orientación de las moléculas de azúcar en el espacio sea alterna. Para simplificarlo: los radicales N-acetilo que están unidos al átomo de carbono 2 del azúcar deben hallarse orientados en direcciones opuestas en unidades vecinas de azúcar. Dicho de otro modo, se necesitan dos sitios activos para la unión del substrato a la enzima o bien hay dos polipéptidos distintos que cooperen en la unión de dos moléculas de azúcar simultáneamente. Así podría iniciarse la síntesis y crecer la cadena.

La quitina sintetasa es una enzima que muestra cooperatividad: la unión de una molécula de substrato facilita la unión de la segunda. La cooperatividad de esta enzima depende de la unión de UDPGlcNAc a los sitios alostéricos, que, al ser ocupados, alteran la estructura de la enzima y facilitan el acceso de las moléculas de substrato a los sitios catalíticos, o activos. Se sabe que, en otros sistemas que poseen sitios alostéricos, éstos se hallan en polipéptidos distintos de los catalíticos. No debe, pues, sorprendernos que las quitinas sintetasas que se han purificado parcialmente aparezcan como agregados de alto peso molecular, cercano al medio millón de daltons, formados por varios polipéptidos.

En el laboratorio, el papel estimulador del UDPGlcNAc puede sustituirse por altas concentraciones del propio azúcar libre (GlcNAc). Y en algunos sistemas incubados en condiciones limitantes de substrato no ocurre la catálisis, si no se añade GlcNAc al substrato. La acción de la quitina sintetasa se activa en presencia de bajas concentraciones de adenosín trifosfato, ATP. Esa estimulación no se debe a una reacción de fosforilación, sino a la unión del nucleótido a la enzima, según se desprende del comportamiento de los análogos del ATP, que, sin ser fosforilantes, muestran también un efecto estimulador.

In vitro, la quitina sintetasa requiere ser activada por tratamiento proteolítico (como el caso de los zimógenos) para manifestar su función, pero se desconoce cuál sea el mecanismo natural de activación *in vivo*. En *Phycomyces blakesleeanus* hemos demostrado que la tripsina, o una mezcla de calcio y calmodulina, desencadenan la síntesis de la enzima, y vale la pena señalar que varios sistemas estimulados *in vivo* por calcio y calmodulina se activan *in vitro* con proteasas.

Para llevar a cabo su función, la quitina sintetasa requiere de un ion metálico divalente. En los diferentes sistemas estudiados se ha visto que el Mg^{2+}, el Mn^{2+} y el Co^{2+} son los más eficientes. Pero bloquean su acción polioxinas y nikomicinas, análogos estructurales del UDPGlcNAc. El uridín difosfato (UDP) y otros nucleótidos, salvo el ATP a bajas concentraciones, inhiben también la enzima.

En 1974 y en colaboración con Salomón Bartnicki-García, lográbamos la síntesis de microfibrillas de quitina. Para sintetizar el polisacárido *in vitro*, partíase de fracciones membranales de distintos hongos; la tasa de síntesis se medía a través de la incorporación de material radiactivo en un producto insoluble en ácido y en álcali, producto cuyas características físicas se desconocían. Nosotros obtuvimos las microfibrillas empleando una forma enzimática solubilizada a partir de membranas del hongo *Mucor rouxii* por exposición a altas concentraciones de UDP-GlcNAc a baja temperatura; no se distinguían nuestros hilillos de los que componían la pared celular, y el espectro de difracción de rayos X corroboró que estaban formados por alfa-quitina.

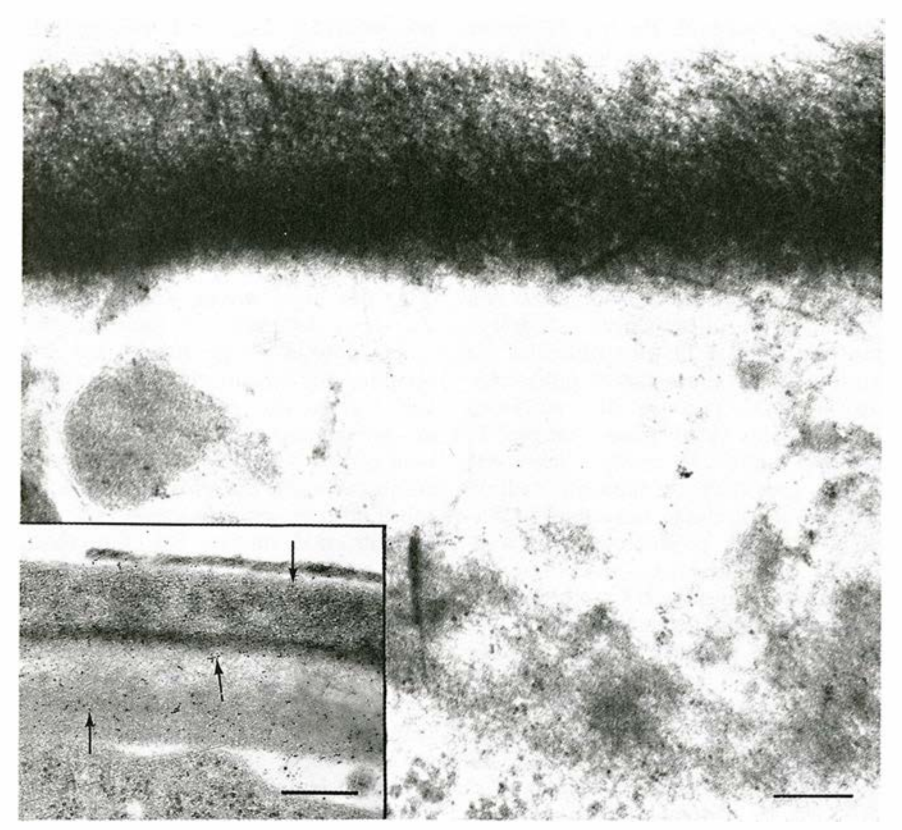
La levadura *Saccharomyces cerevisiae* posee tres quitinas sintetasas diferentes, fenómeno que se descubrió al observar la incapacidad de sintetizar quitina *in vitro* que mostraban los mutantes de la cepa y poseer, no obstante, niveles normales del polisacárido en la pared. La anulación del gen correspondiente (*CHS1*) no afectó al crecimiento de la levadura, señal de que podía prescindir del mismo. Hubo que sugerir, pues, la existencia de otra enzima responsable de la síntesis del polisacárido. El gen (*CHS2*) correspondiente se clonó seleccionando recombinantes hipersintetizadores de quitina *in vitro*, transformados con un plásmido multicopia que transportaba fragmentos del ADN de la propia levadura; la degradación de este gen causó la lisis de las células, prueba de que constituía un elemento indispensable para el crecimiento celular.

Ahora bien, estudios ulteriores demostrarían que, mediante la variación de las condiciones de cultivo, los dobles mutantes afectados en ambos genes *CHS1* y *CHS2* eran viables, aunque mostraban algunas alteraciones en la deposición de la quitina sobre la superficie, semejantes a lo que ocurre en mutantes alteradas en el citoesqueleto. De ahí que se postulara la exigencia de otra tercera quitina sintetasa, que sería la responsable de la síntesis *in vivo* del polisacárido. Dado el carácter de agregado multiproteico de la enzima, quizá no esté fuera de lugar sospechar que algunos de los genes clonados corresponden a proteínas que son elementos del complejo necesarios para la actividad sintetizadora, aunque no constituyan estrictamente el polipéptido catalítico.

El del lugar donde ocurre la síntesis de quitina es punto importante, porque el producto, una vez cristalizado, resulta altamente insoluble. De ahí que se le confine fuera de la membrana citoplasmática, si bien queda pendiente el problema de cómo actuaría la enzima sobre el substrato, estando éste como está acumulado en el interior del citoplasma. Para romper ese círculo vicioso, se ha supuesto que la quitina sintetasa constituye un complejo transmembranal que opera vectorialmente aceptando los radicales glucosilo en la cara interna de la membrana y transfiriéndolos a la cadena naciente que se halla en la cara externa del plasmalema. Hipótesis que se ha visto respaldada por ciertos experimentos *in vitro*, donde se comprobó la acumulación de quitina en membranas de levaduras asociada con la cara externa de las mismas.

Pero cabe otra explicación: el polisacárido se sintetiza intracelularmente en algún compartimento aislado, aunque no cristaliza dentro del mismo hasta que el compartimento se fusiona con el plasmalema y se modifican las condiciones fisicoquímicas que impiden dicha cristalización. Abonan esta idea ciertos ensayos realizados *in vivo* con el ciliado *Eufolliculina uhlighi*, que secreta quitina al medio a través de vesículas. Una vez en el medio, la quitina cristaliza en forma de microfibrillas que sirven de base para la construcción de las lórigas del protozoo. En los hongos leptomitales, la quitina, sintetizada intracelularmente, se acumula en el citoplasma en gránulos de celulina, cuya función se ignora.

Se sabe que, en todos los organismos eucariotas, la síntesis de las proteínas asociadas a la membrana plasmática, y las de exportación, incluyendo en el caso de los hongos las que se asocian con la pared celular, ocurre en ribosomas que se unen a las membranas del retículo endoplasmático (RE). Las proteínas sintetizadas por estos ribosomas penetran en el lumen del RE por un mecanismo vectorial asociado con su síntesis y su glicosilación. Al concluir la síntesis, las proteínas quedan libres en el lumen, o bien, si tienen



5. PARED CELULAR DE LOS HONGOS. La pared celular es la envoltura más externa de las células fúngicas, y la que otorga rigidez, forma y resistencia a éstas. La pared consta de dos tipos de compuestos: matriciales o amorfos, cuya función mecánica es unir, aglutinar y proteger a las microfibrillas, las cuales constituyen los elementos estructurales o esqueléticos. Mediante técnicas selectivas de tinción se puede analizar la distribución de los componentes. La quitina abunda más en las capas internas de la pared y puede ser reconocida por una aglutinina presente en el germen de trigo, la cual se puede hacer opaca a los electrones acomplejándola con oro o con ferritina. En la figura se recoge un corte transversal de *Mucor rouxii* donde se evidencian varias capas de la pared que aparecen con un grado distinto de tinción. Los puntos obscuros son granos de oro, que se acumulan en la capa más interna. La capa más exterior de la foto muestra restos de la pared de la espora. Las fotografías las obtuvo el autor con la ayuda de A. Cárabez–Trejo.

determinadas señales y secciones de la cadena formadas por aminoácidos hidrofóbicos, quedan atrapadas en la membrana.

Empieza entonces el tránsito de estas proteínas a través del sistema transmembrana; pasan al retículo endoplasmático libre de ribosomas (RE liso) y, almacenadas en vesículas, llegan al aparato de Golgi, que dirige el tráfico de proteínas a diversos destinos, entre ellos la superficie celular. Cabe señalar aquí que, en la mayoría de los hongos, el aparato de Golgi no está morfológicamente tan definido como en otros organismos, y sólo podemos hablar de un "aparato de Golgi funcional"; del mismo parten vesículas que llevan proteínas destinadas a la membrana plasmática y proteínas de exportación.

En 1975, Bartnicki-García, Charles E. Bracker, de la Universidad de Purdue, y el autor aislaron, a partir de extractos celulares del hongo *Mucor rouxii*, una población de esas vesículas; en atención a que sólo se ocupan de la síntesis de quitina las denominamos "quitosomas". Se trata de vesículas que miden entre 40 y 70 nanómetros (un nm es la millonésima parte de un milímetro), rodeadas por una finísima membrana. Estas microvesículas, cuando se activan artificialmente *in vitro* mediante una proteasa y se incuban con el substrato para la síntesis de quitina (UDPGlcNAc) y activadores, sufren una serie de cambios irreversibles que conducen finalmente a la formación de microfibrillas de quitina.

¿Cuál es el mecanismo de síntesis de las microfibrillas por los quitosomas? Un estudio minucioso de las microfotografías electrónicas de quitosomas incubados con UDPGlcNAc, proteasas y estimuladores nos manifiesta que, en los primeros estadios de síntesis, aparecen en el interior de los quitosomas fibrillas muy delgadas, que luego aumentan en diámetro y terminan por cristalizar en ovillos constituidos por fibras gruesas de quitina, los fibroides. Los ovillos se forman en el interior de los quitosomas porque las condiciones artificiales impuestas en el ensayo obligan a la cristalización prematura de la quitina.

En un estadio más avanzado, el ovillo rompe la membrana del quitosoma para originar fibrillas rectas de quitina, iguales a las que existen en la pared celular. Se tarda más tiempo en explicar el proceso que en producirse. Basta incubar los quitosomas unos pocos segundos para que se formen masas de fibroides y de microfibrillas.

Estos estudios nos han llevado a sugerir que los quitosomas constituyen la población de vesículas encargadas de transportar la quitina sintetasa; vendrían a ser el reservorio intracelular de quitina sintetasa, listo siempre para desplazarse hacia los sitios de la célula donde ocurre la formación de la pared. Con Rafael Sentandreu, de la Universidad de Valencia, y Amelia Martínez, del Instituto de Investigaciones Citológicas de Valencia, hemos sometido a prueba experimental la hipótesis. Tratamos células de *Mucor rouxii* con tolueno, que torna permeable la membrana celular al UDPGlcNAc, ya que esta molécula no penetra en la célula en condiciones naturales. Al incubar estas células con un sustrato marcado radiactivamente con tritio, la quitina se acumuló en el interior celular, allí donde yacían los quitosomas inmovilizados por el tratamiento. La visualización de la quitina radiactiva se logró mediante la técnica de autorradiografía, que cubre la célula con una película fotográfica que imprime las emisiones del material radiactivo.

No sabemos si la síntesis del polisacárido acontece durante el tránsito de los quitosomas, cuando disponen del substrato disuelto en el citoplasma, ni si las microfibrillas cristalizan cuando la vesícula se fusiona con la membrana plasmática (lo que ocurría con el ciliado mencionado más arriba), ni si, por el contrario, al fusionarse el quitosoma con la membrana crea una complejo sintetizador que produce quitina por el mecanismo de transporte sugerido a propósito de las levaduras.

El quitosoma puede disociarse con ciertos detergentes que liberan los agregados multiproteicos dotados de actividad sintetasa. En este contexto, D. Rast, de Zurich, incubó agregados provenientes de quitosomas del champiñón *Agaricus bisporus* y ob-

servó que cada complejo enzimático formaba microfibrillas muy delgadas, de sólo dos cadenas de quitina. Nos indican estos resultados que el quitosoma posee el número de complejos enzimáticos necesarios para sintetizar las cadenas de quitina constituyentes de la microfibrilla.

La quitina puede depositarse en toda la superficie, lo que origina una morfología celular esférica, o circunscribirse a determinados puntos de la superficie, lo que da lugar al crecimiento tubular del micelio y otras configuraciones. Ello implica que habrá, en la célula, mecanismos que dirigen específicamente a los quitosomas y otras vesículas hacia sitios prefijados de la superficie. La microscopía electrónica nos revela que allí donde ocurre síntesis activa de pared celular, se presentan cúmulos de vesículas. En el caso del micelio que crece apicalmente, las vesículas adquieren tal densidad en la punta que se perciben incluso con un microscopio óptico. En estas condiciones, la acumulación de vesículas semeja un cuerpo refráctil, un corpúsculo basofílico teñido por Brunswick en 1924 y al que dio el nombre de corpúsculo apical ("Spitzenkörper").

¿Cuál es el mecanismo que moviliza las vesículas? A falta de seguridad, se manejan dos candidatos plausibles, el citosqueleto y las corrientes iónicas. En lo concerniente al citosqueleto, lo mismo podrían ser en particular los microtúbulos que los microfilamentos, debidamente organizados; actuarían como rieles sobre los que se deslizarían las vesículas, según se ha visto que ocurre en otros organismos. Por su parte, las corrientes iónicas, al crear campos eléctricos, forzarían la migración de las vesículas por medio de electroforesis. Hay pruebas en favor de ambas hipótesis, pero ninguna determinante.

Cuando se descarga la quitina en el espacio intercelular, debe transcurrir cierto tiempo antes de que cristalice y adquiera una estructura microfibrilar rígida. Durante ese intervalo, la quitina se halla expuesta a la acción química de otras moléculas e imparte a la pared celular naciente propiedades mecánicas distintas de las que poseerá la pared madura. Estamos hablando de un momento que reviste especial importancia para el crecimiento del hongo, puesto que permite la expansión celular. La pared celular en crecimiento es viscoelástica; la pared madura, elástica.

Entre las modificaciones que sufre la quitina antes de cristalizar citaremos su degradación por quitinasas, enzimas hidrolíticas que debilitan la pared y facilitan su expansión cediendo ante la presión osmótica del protoplasma (presión de turgencia). La quitina podría también desacetilarse y transformarse parcialmente en quitosana, si bien ese proceso ocurre principalmente en los zigomicetos y, en forma muy rara, en hongos de otros grupos taxonómicos.

Por último, la quitina forma uniones covalentes con otros componentes de la pared celular (glucanos y proteínas) para construir la pared madura, muy resistente, y que brinda protección mecánica y química al protoplasma de la célula. Avanzado el crecimiento celular, cobra interés la hidrólisis controlada del polisacárido por medio de quitinasas que, al ablandar la pared celular, permiten la formación de ramas laterales y la unión de células de sexos opuestos durante los fenómenos de reproducción sexual.

En resumen, la quitina es un compuesto orgánico indispensable para la existencia de un gran número de organismos. Su síntesis e hidrólisis juiciosamente reguladas permiten el crecimiento y desarrollo de estas especies. Así mismo, el conocimiento de los mecanismos subyacentes nos ha de llevar al control de las plagas agrícolas y enfermedades animales y humanas, mediante el diseño de drogas que inhiben selectivamente la acción de los patógenos. Por último, se encierra en la quitina un recurso poderoso de materia orgánica que puede aplicarse a diversos usos industriales, en sustitución de compuestos tóxicos, contaminantes o no biodegradables.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FUNGAL CELL WALL SYNTHESIS AND ASSEMBLY, por J. Ruiz-Herrera y R. Sentandreu. En *Current Topics in Medical Mycology*, vol. 3, dirigido por M. R. McGinnis y M. Borgers. Springer Verlag; Nueva York, 1989.

LA SÍNTESIS DE LA QUITINA EN LOS HONGOS, por J. Ruiz-Herrera. En *Microbiología*, dirigida por F. Ruiz Berraquero y J. Casadesús. Publicaciones de la Universidad de Sevilla; Sevilla, 1990.

CHITIN BIOSYNTHESIS IN FUNGI, por J. Ruiz-Herrera, R. Sentandreu y J. P. Martínez. En *Handbook of Applied Mycology*, vol. 4, dirigido por D. K. Arora, R. P. Elander y K. G. Mukerji. Marcel Dekker; Nueva York, 1992.

FUNGAL CELL WALL. STRUCTURE, SYNTHESIS AND ASSEMBLY, por J. Ruiz-Herrera. CRC Press; Boca Raton, 1992.

El poder de los mapas

La apariencia, cargada de autoridad, de los mapas modernos enmascara la finalidad con que son elaborados. La comprensión de las limitaciones subjetivas de los mapas es esencial para hacer un uso inteligente de la información que contienen

Denis Wood



Tan por sentada se da la objetividad de los mapas modernos, que sirven de metáfora a otras ciencias, e incluso a la objetividad científica en sí. La historia de la cartografía occidental refuerza esta suposición de objetividad; nos habla de un progreso gradual desde las burdas visiones medievales del mundo hasta las representaciones de hoy, atenidas a criterios actuales de precisión. Pero todos los mapas incorporan



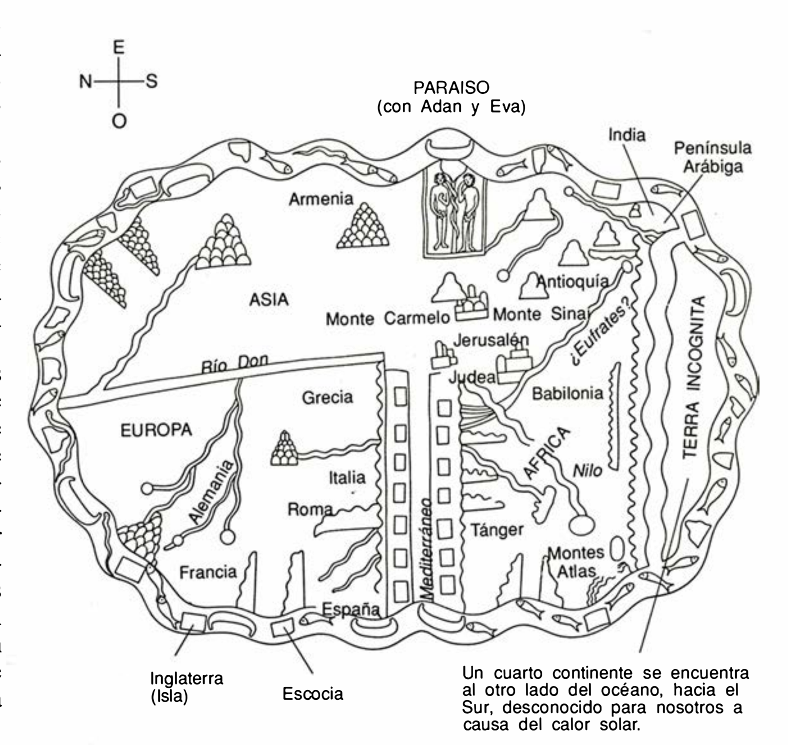
1. IMAGEN DE LA TIERRA compilada por Tom Van Sant a partir de 37 millones de píxeles proporcionados por satélites. Van Sant ha manipulado estos píxeles para retirar las nubes y resaltar ciertos accidentes naturales. La fotografía de la NASA (*a la derecha*) muestra la Tierra con su habitual manto de nubes.

supuestos y convenciones propios de la sociedad o de los individuos que los han elaborado, que saltan a la vista cuando miramos un mapa antiguo, y de los que, sin embargo, no solemos percatarnos cuando examinamos uno moderno.

La historia de la cartografía empieza por los autores de mapas egipcios y babilónicos, y enseguida pasa a las contribuciones griegas y romanas; a continuación rinde tributo a las de los árabes en la Edad Media, y pone en la Europa medieval el nadir de este arte, que desde el siglo quince, sostiene, avanzó con regularidad hasta su culminación con los mapas de hoy, elaborados con la ayuda de satélites y procesamientos digitales.

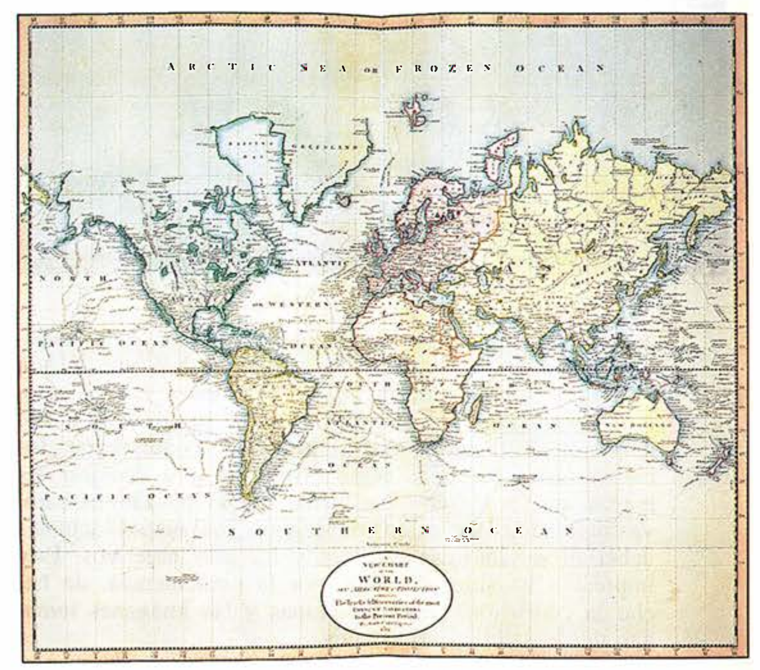
Dada esta historia, quizá nos sorprenda que pocos objetos puedan ser interpretados de forma indiscutible como mapas de la antigüedad. Existen algunas piezas de tejidos que formaron parte de mapas griegos, pero no se conservan los verdaderos mapas. Si exceptuamos las copias medievales de los itinerarios romanos, tampoco conocemos mapas del mundo de la época de Roma, a pesar de las detalladas instrucciones que para elaborarlos encontramos en la *Geografía* de Ptolomeo. En términos estrictos, los historiadores no conocen ningún mapa del mundo que date de antes de la Edad Media. Y no son muchos los mapas medievales que sirven de línea de horizonte a partir de la que medir la altura que ha alcanzado la cartografía.

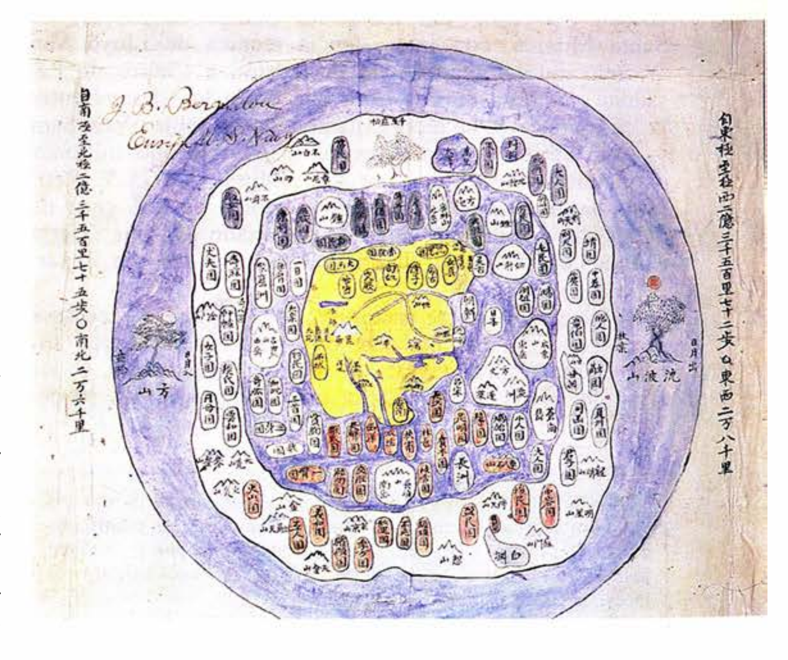
Hay mapamundis medievales de varios tipos. Los ma-



2. MAPAS ANTIGUOS DE LA TIERRA. Reflejan los supuestos de que partían sus autores. El mapa del Beato de Liébana (*página anterior, con un croquis explicativo moderno encima*) revela la visión cristiana del mundo propia del siglo X; coloca el Paraíso, que está en el Este, arriba. Por el siglo XV (*arriba a la derecha*), los mapas "ptolemaicos" derivaron hacia una descripción del mundo destinada a servir mejor los intereses del naciente comercio centrado en Europa. Los mapas decimonónicos, así el extraído del atlas de John Cary (*derecha, en el centro*), incorporan esos intereses comerciales y políticos. Los autores orientales sitúan a China en el centro del mundo, como se puede observar en el mapa coreano del siglo XIX reproducido abajo, a la derecha.







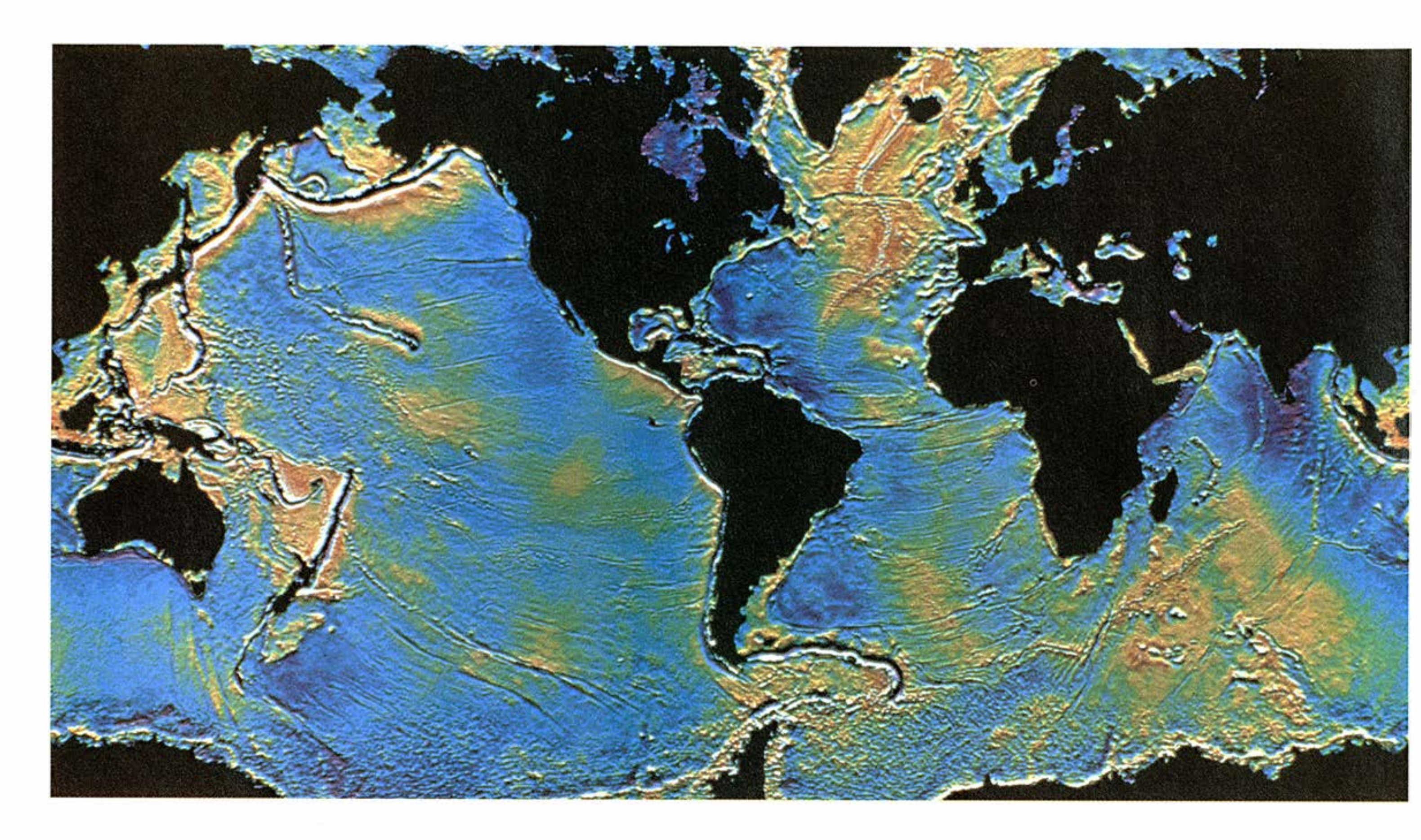
pas dibujados para acompañar el *Comentario sobre el Apocalipsis* de Beato de Liébana son ilustrativos. Datan del siglo X o de poco más tarde, y puede que sigan un prototipo del siglo VIII. Los mapas del Beato son rectangulares, pero, como otros mapamundis de la época, están orientados de forma que el Este —donde se encuentra el Paraíso, encerrado en una viñeta cuadrada— quede en la parte superior. Los tres continentes poblados por los hijos de Noé están en la mayor parte de los mapamundis dispuestos de la siguiente manera: Europa, abajo a la izquierda; Africa, abajo a la derecha; Asia, arriba. Los mapas del Beato incluyen también un cuarto continente, la *terra incognita*, requerido por el texto evangélico (los Apóstoles fueron enviados a predicar el Evangelio "a las cuatro esquinas de la tierra").

Por encima de todo, los mapas del Beato son visiones de la Tierra en cuanto escenario de la historia cristiana del mundo; la precisión físico-geográfica es un detalle secundario. Comparados con nuestros atlas parecen pintorescamente erróneos, pero carece de sentido afirmar que los mapas más recientes proporcionan un sentido del mundo "más verdadero". Dada su función espiritual, los mapas del Beato son absolutamente correctos.

El redescubrimiento de los textos de Ptolomeo sobre la elaboración de mapas, en la época de las Cruzadas, condujo a un estilo cartográfico de apariencia más moderna allá por el siglo XIV. Los cartógrafos, siguiendo las instrucciones y datos de Ptolomeo, produjeron mapas en los que el Norte caía en la parte superior y donde los lugares estaban fijados en un enrejado de longitudes y latitudes. Aunque estos mapas guardan cierta semejanza con los de nuestros días, estaban influidos por las convenciones de los mapamundis medievales. En el Sur aún mostraban la *terra incognita*, hacían amplio uso de representaciones decorativas (como los símbolos de los doce vientos), y empleaban convenciones cromáticas tradicionales (por ejemplo, el mar Rojo se pintaba de este color). Sin embargo, los mapas ptolemaicos anuncian un progresivo alejamiento de la interpretación del mundo a la luz de la Biblia en favor de preocupaciones más prácticas, que servían mejor al naciente comercio mundial centrado en Europa.

Los atlas, cada vez más comunes, del siglo XIX muestran un mundo manifiestamente eurocéntrico. Sus límites, signos convencionales, ilustraciones y anotaciones expresan con claridad los intereses políticos, comerciales y científicos de los estados europeos; se resaltan las posesiones coloniales. Parten de la tradición ptolemaica y establecen un nuevo conjunto de rasgos convencionales. El Norte está arriba, la longitud cero grados pasa por Greenwich (Inglaterra) y los mapas están centrados en Europa Occidental, América del Norte o el Atlántico Norte. La configuración resultante ha llegado a ser tan familiar que pocos se dan cuenta de su carácter arbitrario.

Conforme la realización de mapas se fue transformando en cartografía científica, resultó cada vez más difícil



aceptar que los mapas son ventanas abiertas a la sociedad que los configuran en la misma medida que lo son al mundo propiamente dicho. En Occidente, la epistemología positivista y la confianza en el progreso material animaron a historiadores y profanos a despreciar los mapas no-occidentales como primitivos y a denigrar los mapas antiguos como productos de un pasado bárbaro, ya superado. Por extensión lógica, los mapas actuales deberían ser los más precisos y los más objetivos. Esta impresión ha sido reforzada por la coincidencia, de hecho la confusión, entre los mapas y las imágenes tomadas desde satélites espaciales.

Fijémonos, por ejemplo, en el mapa *Geosphere*, elaborado por Tom Van Sant, del *Geosphere Project* de Santa Mónica, con la asistencia técnica de Lloyd Van Warren, del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena. Se trata de una obra que borra los límites entre la cartografía y la representación por satélite. Van Sant y Van Warren compusieron su mapa cribando millones de píxeles transmitidos por los satélites *TIROS-N*. Retiraron las imágenes en que la presencia de una capa de nubes oscurecía el suelo. El resultado es una Tierra exenta cuyos límites continentales define un ojo imparcial, electrónico.

El mapa Geosphere incorpora sus propias obligaciones ideológicas lo mismo que incorporaron las suyas los mapamundis medievales, los mapas ptolemaicos o los atlas del siglo XIX. Como la mayor parte de sus predecesores, Van Sant ha optado por disponer el ecuador por el centro, el Atlántico en medio y el Norte arriba. Además, Van Sant reconoce que ha filtrado y modificado los datos del satélite de varias maneras deliberadamente subjetivas.

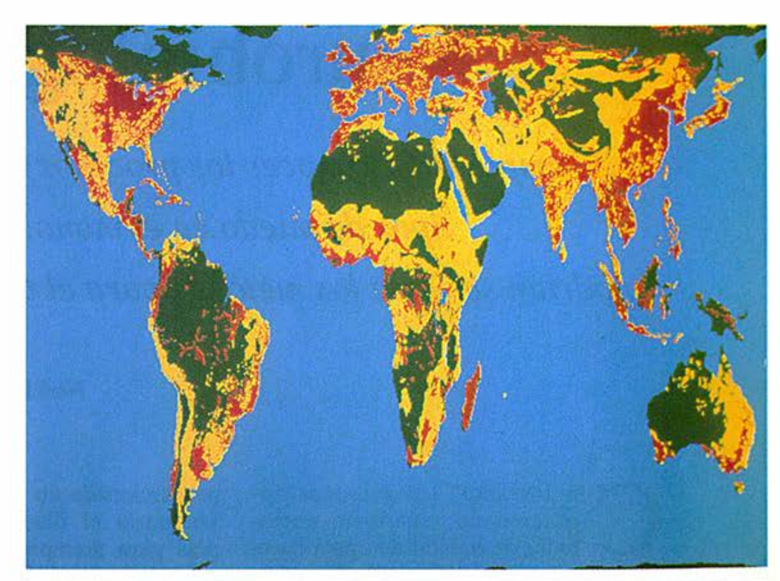
La misma supresión de las nubes omite uno de los rasgos característicos del aspecto que la Tierra ofrecerá a quien la contemple desde el espacio. En aquellos parajes donde no se podía disponer de imágenes libres de nubes, éstas fueron substraídas píxel a píxel. Para las latitudes bajas y moderadas, los autores del mapa seleccionaron las imágenes que mejor mostraban la vegetación del verano; para latitudes y altitudes grandes, seleccionaron imágenes propias de paisajes nevados. Se resaltaron los sistemas fluviales para realzar los ríos y, paradójicamente, se aplicó falso color para conferir mayor verismo a la cubierta vegetal. Todas estas decisiones buscan que el mapa sea más útil y fácil de leer. Pero hay que tener presente que la ausencia de nubes, la extensión de la cubierta vegetal, la visibilidad de los ríos y todos los colores que se ven en el mapa son expresiones propias de la visión de sus manipuladores, y no atributos intrínsecos de la Tierra.

La iluminación y coloración del mapa de Van Sant realzan los aspectos naturales del planeta y omiten la huella social. W. T. Sullivan, de la Universidad de Washington, ha creado un mapa casi antitético al anterior, que centra su atención en el impacto humano. Publicado por el Planetario Hansen, utiliza imágenes libres de nubes transmitidas por los satélites *TIROS-N*, si bien del hemisferio nocturno. Sullivan elimina los contornos de océanos y continentes, para dejar sólo luces de ciudades y fuegos.

Un tercer mapa, derivado también de los datos transmitidos desde satélite, presenta otra visión, precisa aunque diferente, del mundo. Realizado por William F.

DENIS WOOD, geógrafo, se dedica al estudio de la relación del hombre con su entorno, especialmente por su manifestación en el comportamiento de los niños, en mapas y en dibujos. Se formó en la Universidad de Clark y enseña dibujo en la estatal de Carolina del Norte.

3. DISTORSIONES producidas en los mapas modernos para subrayar su propósito. En "Campos gravitatorios de los océanos terrestres", de William Haxby (*página anterior*), los continentes carecen de importancia. El mapa de "perturbaciones humanas en ecosistemas", publicado por *Conservation International* (*arriba a la derecha*), distorsiona la forma de los continentes para mantener sus tamaños relativos. El de W. T. Sullivan, "La Tierra de noche" (*centro, derecha*), realizado con imágenes de satélite tomadas en las zonas nocturnas de la Tierra, destaca la presencia humana sobre el planeta. Una curiosa forma de representación se encuentra en el "Mapa correctivo universal de Mac Arthur" (*abajo a la derecha*), que coloca el Sur arriba para manifestar el punto de vista australiano.







Haxby, del observatorio Lament Doherty, adscrito a la Universidad de Columbia, el mapa representa anomalías del campo gravitatorio en el fondo de los océanos (es decir, ligeras variaciones de la atracción gravitatoria), determinadas gracias a las finísimas mediciones altimétricas de la superficie marina efectuadas por el satélite *SEASAT*. Haxby prescinde en absoluto de la superficie terrestre. El mapa de las anomalías gravitatorias parece mostrar la topografía del fondo oceánico, ilusión acentuada por la manera en que el autor ha iluminado simas y valles, como si estuvieran bajo el sol poniente. Este método de representación hace los datos más comprensibles, pero puede inducir a error al poco avisado.

El mapa de Haxby proclama abiertamente su carácter subjetivo: las anomalías gravitatorias en el océano reciben vibrantes colores falsos, y los continentes, en negro, carecen de importancia. El hecho de que este mapa excluya información sobre ciertas partes de la Tierra deja bien claro que es sólo un mapa. Más cuidado hay que tener al interpretar mapas que aparentemente muestran la Tierra tal y como la vería un observador del exterior. Estos mapas se ofrecen a veces como "retratos" o "vistas", lo que respalda esa falsa impresión.

No hay planisferio que no sea subjetivo, en el sentido de que no puede evitarse que distorsione tamaños y formas de los accidentes terrestres. Los cartógrafos sortean tal limitación de muchas maneras. El mapa de Van Sant consigue precisión en la representación de las formas a expensas de los tamaños relativos, lo que es apropiado para sus fines. El mapa de *Conservation International*, por contra, ha optado por una proyección de áreas iguales, que preserva los tamaños relativos de los continentes a costa de distorsionar sus perfiles. *Conservation International* tiene por objetivo la conservación de las selvas húmedas tropicales, de modo que ha recurrido a una proyección que no exagera el tamaño de Europa o Norteamérica en detrimento de Africa Central, Asia o Sudamérica, como ocurre en tantas y tantas proyecciones corrientes. Lo mismo que el mapa de Van Sant, el de *Conservation International* usa una coloración especial para destacar algunos aspectos naturales del planeta, pero recurre al falso color para atraer la atención hacia los bosques húmedos amenazados.

Aunque cada mapa de éstos busca la precisión, a duras penas podrían ser más diferentes. Esta es la contradicción de los mapas: que son una representación que se dice objetiva de un mundo que sólo subjetivamente cabe representar.

La utilidad de los mapas deriva de su sesgo y subjetividad; hay que reconocer uno y otra. Los mapas han de ser explícitos por lo que toca a la elección sus datos y la manera en que los representan. Deben declararse las distorsiones introducidas. Hay que educar a los usuarios sobre lo que pueden o no recibir de ellos. La contraposición de la cara objetiva y la subjetiva que todo mapa tiene ha de ser superada.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE HISTORY OF CARTOGRAPHY, vol. I: CARTOGRAPHY IN PREHISTORIC, ANCIENT AN MEDIEVAL EUROPE AND THE MEDITERRANEAN, dirigida por J. B. Harley y David Woodward. University of Chicago Press, 1987.

MAPPING THE NEXT MILLENNIUM: THE DISCOVERY OF NEW GEOGRAPHIES. Stephen S. Hall. Random House, 1992.

THE POWER OF MAPS. Denis Wood. Guilford Press, 1992.

Neurobiología del miedo

Se empiezan a conocer los procesos neuroquímicos que originan diferentes tipos de miedo en el mono. De los resultados obtenidos podrían servirse los métodos para el tratamiento de la ansiedad en el hombre

Ned H. Kalin

Con los años, las personas adquieren un repertorio variopinto de habilidades para hacer frente a una amplia gama de situaciones de miedo. Intentarán aplacar a un airado profesor o un jefe irritado, y gritarán o correrán si son perseguidas por un agresor. Pero habrá quien se derrumbe en circunstancias que otros considerarían de escasa entidad. El miedo al ridículo podría hacerles temblar sin fuerzas para controlarse cuando se les invita a hablar en público, o el terror ante extraños podría llevarles a encerrarse en casa, incapaces de ir al trabajo o salir a hacer la compra. ¿Por qué algunos son presa de un miedo excesivo?

En la Universidad de Wisconsin en Madison, estoy investigando con Steven E. Shelton el problema. Nos proponemos identificar los procesos cerebrales específicos que regulan el miedo y los comportamientos asociados. A pesar de las técnicas de captación de imágenes no invasivas, resulta todavía muy difícil obtener la misma información en el hombre. De ahí que hayamos centrado nuestra atención en el macaco (*Macaca mulatta*), animal que pasa por algunas de las mismas etapas de desarrollo fisiológico y psicológico que los humanos, si bien en un intervalo temporal más estrecho. La profundización en la naturaleza y funcionamiento de los circuitos neuronales que modulan el miedo en los monos debiera servir para determinar qué procesos cerebrales orginan pareja ansiedad desproporcionada en las personas, lo que facilitaría el diseño de nuevas terapias para atemperarla.

La intervención acertada alcanzaría su mayor eficacia si se aplicara en una edad temprana. Se corrobora día a día que los jóvenes excesivamente asustadizos y temerosos se encuentran en grave riesgo de sufrir mañana trastornos emocionales. El grupo de Jerome Kagan, de la Universidad de Harvard, ha demostrado que el niño de timidez exagerada a los dos años tiene más probabilidades de desarrollar ansiedad y depresión en etapas posteriores de su vida que otro menos encogido.

Lo cual no significa que tales trastornos sean inevitables, por más que el miedo excesivo contribuya a una lucha emocional a lo largo de toda la vida. Consideremos un niño profundamente retraído ante otros que le convierten en blanco de chanzas durante el período escolar. El pequeño podría empezar a sentirse desplazado y, por ende, a apartarse todavía más de sus compañeros. Con el paso del tiempo podría quedar atrapado en un círculo vicioso que acabe llevándole al aislamiento, baja autoestima, sensación de fracaso y a esa ansiedad y depresión a que se refiere Kagan.

De acuerdo con ciertas observaciones, los niños excesivamente temerosos podrían ser más proclives a enfermedades físicas. Muchos jóvenes que se encuentran permanentemente cohibidos en situaciones no familiares sintetizan mayor cantidad de hormonas de estrés, incluido el cortisol, un producto de la glándula suprarrenal. Ante una amenaza, esas hormonas desempeñan una función esencial. Aseguran que los músculos tengan la energía necesaria para "la lucha o la huida". Pero algunos datos indican que las elevaciones prolongadas de las hormonas del estrés podrían facilitar la aparición de úlceras gástricas y enfermedades cardiovasculares.

Más aún. Por mecanismos que desconocemos, el niño tímido y sus familiares están más predispuestos que otros a padecer alteraciones alérgicas. En los roedores y en los primates no humanos se ha visto que una elevación persistente del cortisol aumenta la vulnerabilidad de las neuronas en el hipocampo, haciéndose más sensibles a los daños causados por otras substancias; esta región del cerebro se halla involucrada en la memoria, la motivación y la emotividad. Es probable que las neuronas del hombre se afecten de forma semejante, aunque por el momento no disponemos de pruebas directas.

Cuando hace unos 10 años acometimos esta línea de investigación, sabíamos Shelton y yo que deberíamos empezar por descubrir las señales capaces de provocar miedo e identificar los comportamientos que reflejaran diferentes tipos de ansiedad. Cubierta esa etapa, podríamos proceder a determinar la edad en la que los monos comienzan a adecuar, de forma selectiva, sus comportamientos de defensa ante estímulos específicos. Mediante la determinación de las zonas del cerebro que alcanzan su madurez durante ese período, podríamos orientarnos por las regiones vinculadas a la regulación del miedo y a la conducta relacionada con ese temor.

Los experimentos se realizaron en el Centro Regional de Investigaciones Primatológicas de Wisconsin y en el Laboratorio de Primatología de Harlow, ambos adscritos a la Universidad de Wisconsin. Hemos acotado

NED H. KALIN dirige el departamento de psiquiatría de la facultad de medicina de la Universidad de Wisconsin en Madison. Trabaja también en el Centro de Investigaciones Primatológicas adscrito a dicha institución superior. Inició su formación en la Universidad estatal de Pennsylvania, doctorándose por la Facultad de Medicina Jefferson de Philadelphia en 1976.

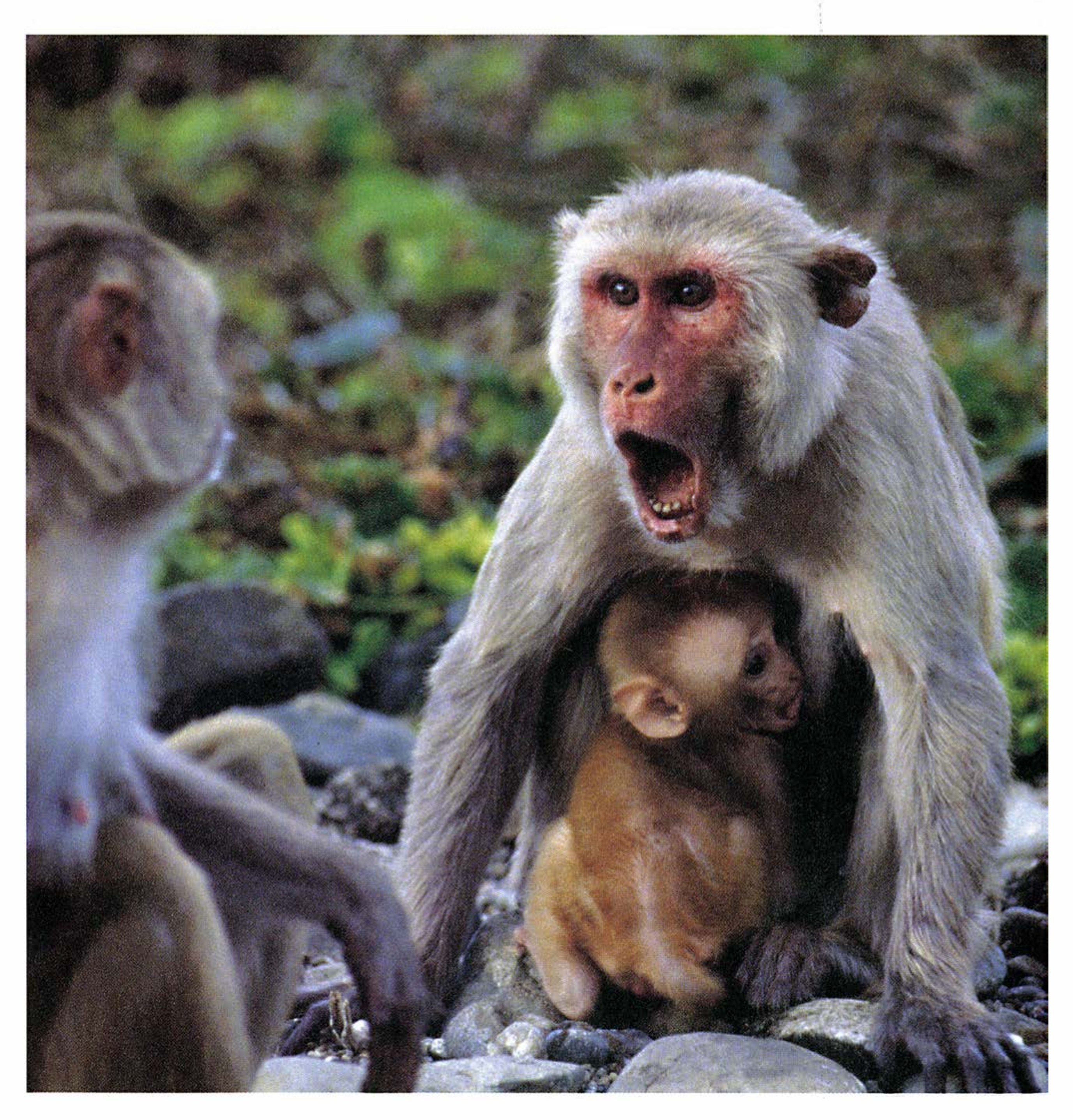
1. EL MACACO refleja su actitud de alarma (*derecha*) en el momento en que otro mono se acerca a su cría (*izquierda*). El miedo de la madre se evidencia en su expresión amenazadora: con su boca abierta y mirada agresiva pretende intimidar al posible atacante.

diversos comportamientos exponiendo los monos, de edades comprendidas entre 6 y 12 meses, ante tres situaciones relacionadas. En la situación de aislamiento, separamos una cría de su madre y la dejamos sola en una jaula durante 10 minutos. En la situación de displicencia, sin contacto visual, una persona permanecía inmóvil fuera de la jaula y evitaba mirar a la cría solitaria. En la situación de mirada sostenida, una persona permanecía inmóvil frente a la jaula que, adoptando una expresión neutral, dirigía su mirada directamente hacia el animal. Estas condiciones se acercan bastante a las que suelen asustar a nuestros primates en su estado natural salvaje o a las que los niños encuentran cuando se les deja en un jardín de infancia.

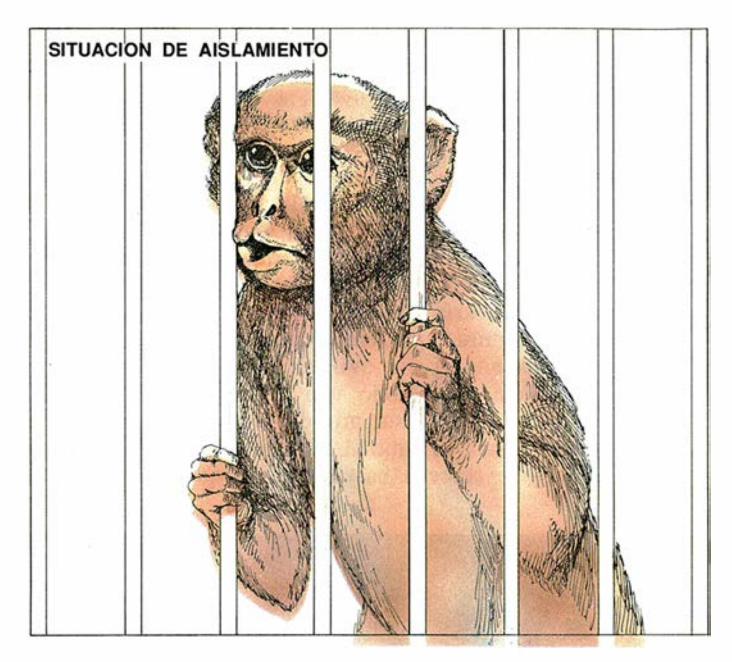
En la condición de aislamiento, la mayoría de los monos se tornan muy activos y emiten, apretando sus labios, unos melodiosos susurros parecidos a un arrullo. Comienzan con un tono muy bajo, que después aumenta para decaer por fin. Hace más de 30 años Harry F. Harlow, entonces en Wisconsin, llegó a la conclusión de que, cuando se separa de su madre a una cría, la tendencia inmediata del mono es de carácter afiliativo; es decir, anhela recuperar la sensación de cercanía y seguridad que le proporciona la madre. Los movimientos y los susurros le ayudan a atraer la atención de su progenitora.

En la situación generadora de más miedo en que se evita la mirada, los monos reducen su actividad, hasta quedarse incluso "helados", inmóviles durante largos períodos. Cuando una cría divisa un posible predador, su intención se traslada del llamar la atención de la madre al pasar totalmente inadvertida. La inhibición del movimiento —una respuesta frecuente en muchas especies— limita la probabilidad de que el ataque se produzca.

Si el pequeño percibe que ha sido



2. TRES SITUACIONES EXPERIMENTALES ponen en marcha comportamientos distintos relacionados con el miedo en el macaco que ya ha cumplido los 2 meses de edad. Cuando se encuentra encerrado en la jaula (*izquierda*), el animal se muestra muy activo y emite sonidos de susurro para atraer la atención de su madre. Si una persona se acerca evitando el contacto visual (*centro*), el mono intenta pasar inadvertido, permaneciendo inmóvil o escondiéndose detrás del portillón de la comida. Si el intruso le fija la mirada (*derecha*), el animal se torna agresivo.



descubierto, cambia de estrategia e intenta rechazar el ataque. La condición de mirada sostenida evoca, pues, un tercer grupo de respuestas. Los monos exhiben un amplio repertorio de gestos de hostilidad: emiten "ladridos" (forzando el aire del abdomen a través de las cuerdas vocales para lanzar una especie de gruñido), dirigen la mirada atrás, adoptan expresiones de amenaza, enseñan los dientes y sacuden la jaula. Mezclan a veces amenazas con actitudes de sumisión: muecas de cierto miedo cautelar y rechinamiento de dientes. En esta situación aumenta también el nivel de los susurros, que se hace muy superior al que se observa cuando los animales andan solos. (Como veremos más adelante, sospechamos que los susurros ante una mirada sostenida cumple una misión algo distinta de la desempeñada en la situación de aislamiento.)

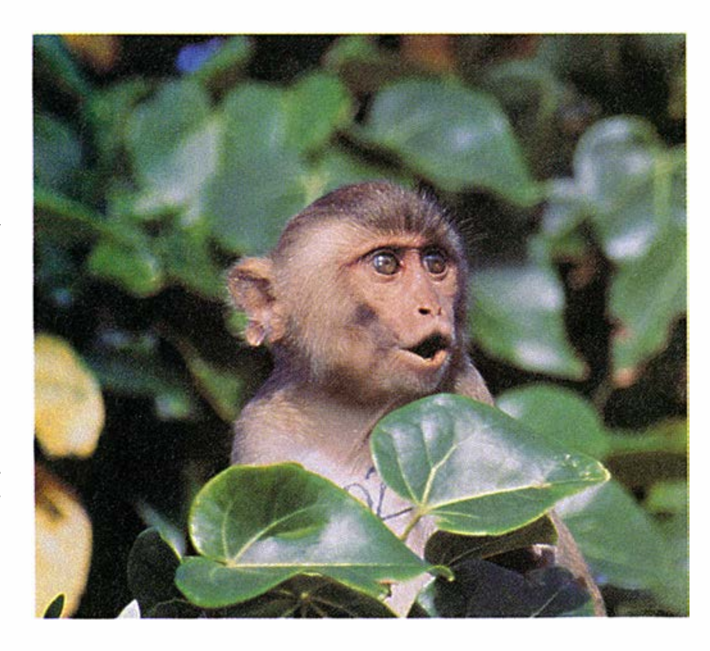
Los monos, dicho sea de paso, no son los únicos que se ponen en estado de alerta ante una mirada fija, o responden con recíproco reto para intimidar a sus atacantes. Cangrejos, camaleones y pájaros, entre otros grupos dispares, perciben la mirada como una amenaza. Algunos peces e insectos han desarrollado manchas protectoras que se asemejan a los ojos; estas manchas pueden evitar ataques o redirigirlos hacia zonas no vitales del cuerpo. En la India, los campesinos se colocan máscaras detrás de la cabeza para espantar a los tigres y prevenir así un posible ataque por la espalda. El propio hombre es sensible a una mirada fija; la actividad cerebral aumenta cuando se recibe una mirada, y la persona que se encuentra en una situación de ansiedad o de depresión tiende a evitar la mirada fija de otras personas.

Establecidas las tres constelaciones de conductas de defensa, había que determinar en qué momento de su vida empieza el mono a aplicarlas eficazmente. Por distintos motivos llegamos a la conclusión de que tal capacidad electiva emerge alrededor de los dos meses de edad. En efecto, la madre permite a sus hijos que jueguen con sus iguales en ese momento, por la presumible razón de que los adultos confían en que, a partir de entonces, las crías sabrán defenderse por sí solas razonablemente bien. A las 10 semanas de edad, los monos responden con diferentes emociones ante expresiones específicas de la cara de otros monos —señal clara de que al menos algunas de las conexiones innatas, o las habilidades aprendidas, necesarias para discernir los estímulos amenazadores están en orden.

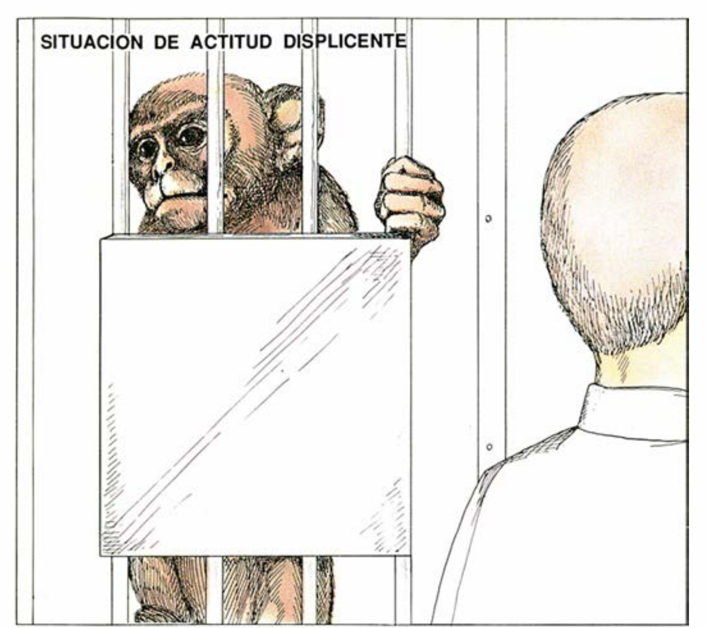
Para establecer el período crítico del desarrollo examinamos cuatro grupos de crías de edades comprendidas entre unos pocos días y 12 semanas. Las separamos de sus madres. Dejamos que se fueran adaptando a una jaula desconocida. Y exponíamos luego los monitos ante situaciones de aislamiento, de contigüidad diplicente sin contacto visual y de mirada sostenida. Todas las sesiones se grabaron en vídeo para su ulterior análisis.

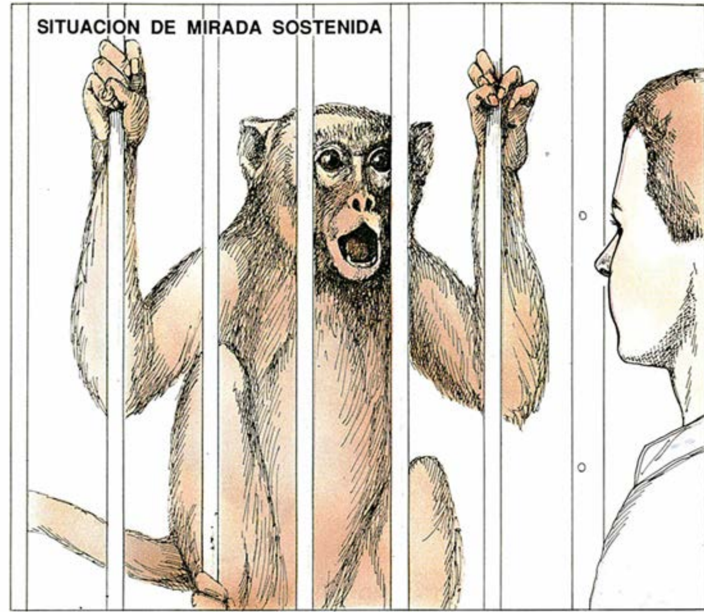
Los más pequeños (de recién nacidos a 2 semanas de edad), aunque desplegaban comportamientos de defensa, carecían de cierta coordinación motora y parecían actuar erráticamente, como si permanecieran ajenos a la presencia o a la mirada del observador intruso. Los animales de los otros dos grupos de edades intermedias presentaban un mejor control del movimiento, pero sus acciones parecían no guardar relación con las condiciones de la prueba. Observación ésta que nos denunciaba que el control del movimiento no era el determinante primario de la respuesta selectiva.

Sólo los animales del grupo de mayor edad (entre 9 y 12 semanas) afrontaron de manera diferente cada situación, y sus reacciones no sólo fueron las apropiadas, sino también idénticas a las de los monos maduros. De donde se infiere que el intervalo de las nueve a las doce semanas resulta decisivo en su capacidad de modular adecuadamente la actitud de defensa y hacer frente a lo que el cambio en su mundo circundante les exige.



3. COMPORTAMIENTOS TIPICOS: susurro (*izquierda*), inmovilidad (*centro*) y gesto hostil de mostrar los dientes (*derecha*). Se provocan en el laboratorio sometiendo al animal a distintas condiciones de aislamiento, evitación de contacto visual o mirada sostenida. Y se observan también en pequeños y adultos que viven en libertad. Estas fotografías se obtuvieron en Cayo Santiago, una isla cercana a las costas de Puerto Rico.





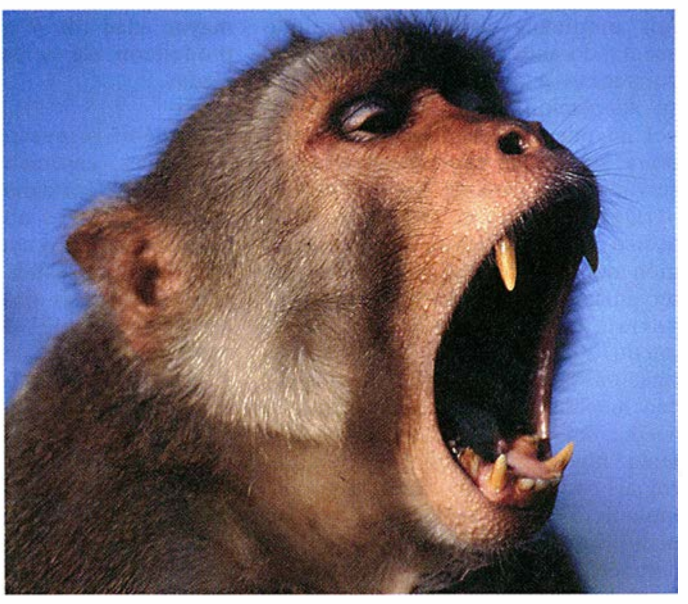
Otros investigadores, que habían trabajado sobre todo con roedores, abonaban la idea de que había tres zonas interconectadas del cerebro que regulan la expresión del miedo. Sospechábamos que estas regiones alcanzaban la maduración funcional durante el período que va de 9 a 12 semanas y servía de base para la reacción selectiva que observábamos. Una de las regiones en cuestión es la corteza prefrontal; abarca ésta una porción extensa de las áreas laterales de la corteza cerebral en el lóbulo frontal. Se cree que la corteza prefrontal, un área cognitiva y emocional, participa en la interpretación de los estímulos sensoriales y constituye probablemente un sitio donde se establece la valoración de un peligro potencial.

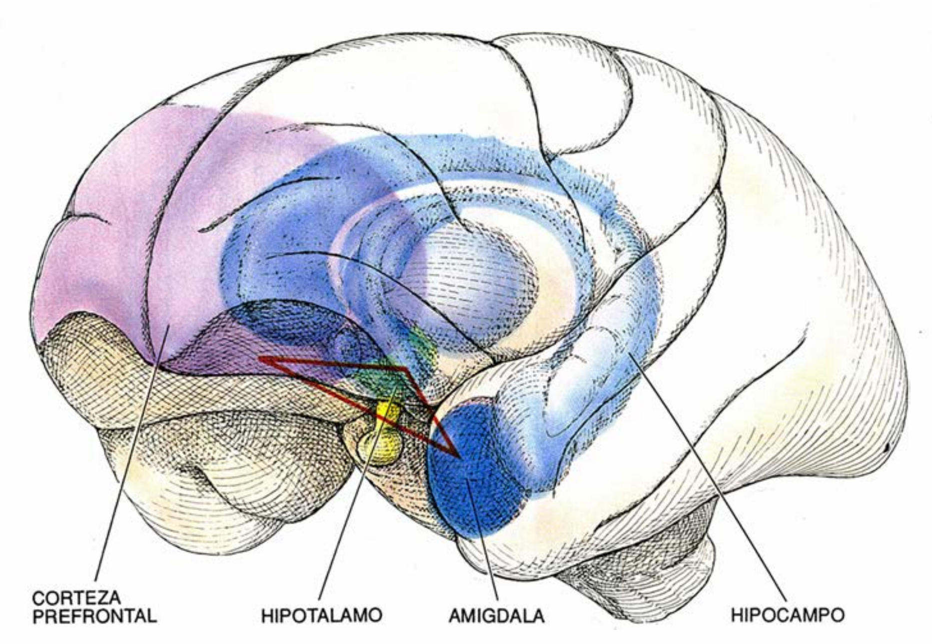
La segunda región es la amígdala, parte de un área primitiva del cerebro denominada sistema límbico (que incluye el hipocampo). Al sistema límbico en general y a la amígdala en particular se les ha involucrado en la generación del miedo.

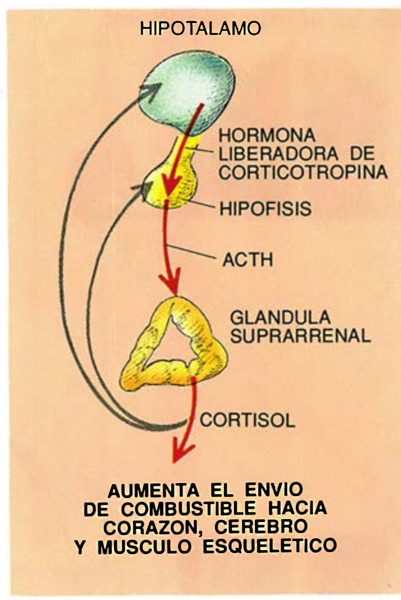
La tercera región de que hablamos es el hipotálamo. Localizado en la base del cerebro, es un componente del sistema hipotalámico-hipofisario-suprarrenal. En respuesta a las señales de estrés en otras zonas del cerebro, tales como el sistema límbico y otras regiones corticales, el hipotálamo segrega la hormona liberadora de corticotropina. Este polipéptido activa la hipófisis, localizada debajo del cerebro, y le hace segregar hormona adrenocorticotrópica (ACTH). El ACTH estimula, a su vez, la liberación de cortisol por parte de la glándula suprarrenal, que prepara el organismo para la defensa.

De acuerdo con los datos neuroanatómicos recogidos en otros laboratorios, consideramos fundada nuestra sospecha de que la maduración de estas regiones del cerebro constituye la base de la respuesta selectiva en el período entre 9 y 12 semanas. En corroboración, se ha demostrado que, durante este período, la formación de sinapsis (puntos de contacto entre las neuronas) alcanza su máximo en la corteza prefrontal y en el sistema límbico (incluida la amígdala), así como en la corteza motora y visual y en otras áreas sensoriales. Patricia S. Goldman-Rakic, de la Universidad de Yale, ha establecido también que, a medida que madura la corteza prefrontal del macaco, empieza a emer-









4. TRES REGIONES CEREBRALES, conectadas entre sí por vías neuronales (*representadas esquemáticamente por las líneas rojas*), regulan el comportamiento relacionado con el miedo. La corteza prefrontal (*púrpura*) participa valorando el peligro. La amígdala (*azul oscuro*) es uno de los constituyentes fundamentales del sistema límbico responsables de la producción de emociones (*azul claro*). Y el hipotálamo (*verde*), en respuesta a las señales procedentes de la corteza prefrontal, de la amígdala y del hipocampo, dirige la liberación de hormonas (*flechas rojas del recuadro*) que sustentan las respuestas motoras ante la percepción de una amenaza. (Las flechas grises representan la actividad inhibidora del cortisol.)

ger la capacidad para controlar el comportamiento a tenor de la experiencia adquirida. Esta habilidad es necesaria si uno ha de enfrentarse con éxito al peligro.

La madurez de la corteza prefrontal parece revestir parejo interés para que el hombre distinga entre señales con un significado amenazador. El equipo encabezado por Harry T. Chugani, de la Universidad de California, ha demostrado que la actividad de la corteza prefrontal aumenta cuando el niño alcanza la edad de 7 a 12 meses. Durante ese intervalo —que parece ser análogo al período en que los monos comienzan a responder selectivamente ante el miedo—, los niños empiezan a sentir un miedo acentuado ante los extraños. También comienzan a adquirir experiencia en su adaptación social; regulan su nivel de miedo basándose en la interpretación de las expresiones que observan en la cara de los padres.

¿Qué es lo que se puede decir acerca del hipotálamo, la tercera región del cerebro que suponíamos intervenía en la regulación de un comportamiento relacionado con el miedo? Los resultados de las investigaciones, ya publicados, no nos dicen mucho acerca de su desarrollo o acerca del desarrollo de todo el sistema hipotalámico-hipofisario-suprarrenal en el mono. Nuestra propia inquisición, sin embargo, pone de manifiesto que todo ese sistema madura en paralelo con la corteza prefrontal y el sistema límbico.

Para nuestros estudios hemos utilizado, por marcador de la función del sistema, la hormona hipofisaria ACTH. Volvimos a examinar cuatro grupos de monos de edades comprendidas entre unos pocos días y 12 semanas. En cada cría determinamos los niveles de ACTH en sangre extraída mientras estaban con su madre. Esta lectura nos proporcionaba una línea basal. También medíamos los niveles de ACTH en muestras de sangre obtenidas 20 minutos después de haber separado al animal de su madre. Los niveles hormonales aparecían altos en los cuatro grupos durante la separación. Pero sólo en los monos pertenecientes a los grupos de mayor edad (de 9 a 12 semanas) se produjeron elevaciones muy pronunciadas.

La débil respuesta de los más jóvenes, especialmente en los de menos de 2 semanas, es congruente con los hallazgos obtenidos con ratas recién nacidas, cuya respuesta hormonal ante el estrés está muy recortada durante las dos primeras semanas de la vida. El desarrollo del sistema hormonal del estrés en roedores y primates puede muy bien mantenerse en suspenso durante los primeros estadios de la vida para proteger las jóvenes neuronas de los efectos potencialmente nocivos del cortisol.

Convencidos de que el sistema hipotalámico-hipofisario-suprarrenal ha alcanzado la madurez funcional entre las 9 y las 12 semanas, proseguimos nuestra investigación para determinar si los niveles de cortisol y de ACTH podrían explicar, en parte, las diferencias individuales en el comportamiento defensivo. También teníamos curiosidad por saber si las respuestas de las crías se asemejaban a las de sus madres; una correspondencia indicaría que un análisis ulterior de las madres y de los pequeños podría esclarecer las aportaciones relativas de herencia y aprendizaje en las reacciones frente al miedo. Atendimos, sobre todo, a la propensión a quedarse inmóvil, un rasgo estable en nuestros sujetos de observación.

En una línea de investigación medimos los niveles basales de cortisol en monos de edades comprendidas entre 4 meses y 1 año, y después observábamos cuánto tiempo permanecían inmóviles en situaciones en las que no se establecía un contacto ocular. Los monos que habían comenzado con niveles relativamente bajos de cortisol permanecían quietos durante períodos más cortos que las otras crías con niveles de cortisol más elevados —un patrón que también habíamos observado en otros estudios con hembras adultas. Durante su primer año de vida, los monos se van pareciendo más a sus madres desde el punto de vista hormonal y de comportamiento. Cuando el animal ronda los 5 meses, las elevaciones de sus niveles de ACTH inducidas por el estrés corren paralelas a las de sus madres. Y para el momento en que cumplen el año, la

duración de la inmovilidad en la situación de ausencia de contacto ocular también corresponde a la de la madre.

Algunos de estos resultados se acercan a los obtenidos en humanos. Los niños superinhibidos tienen a menudo padres que padecen ansiedad. Kagan y su equipo han observado, además, que los niveles basales de cortisol tienen un valor pronóstico de la reacción de esos niños ante una situación de miedo. Midieron las concentraciones de cortisol en la saliva de los niños mientras se encontraban en casa (donde se supone que están más relajados) y se les seguía después cuando se enfrentaban en el laboratorio ante una situación no familiar; los niveles basales de cortisol elevados se asociaban con una mayor inhibición ante una situación nueva para ellos.

Tales semejanzas entre el hombre y el mono respaldan la idea de que el simio constituye un modelo razonable para el estudio de la reactividad emotiva en el hombre. El nexo entre los niveles basales de cortisol y la duración de la inmovilidad o de la inhibición sugiere también que los niveles de las hormonas del estrés influyen en la adecuación de la respuesta del animal y del hombre ante una situación de miedo. (Este efecto puede venir mediado en parte por el hipocampo, donde la concentración de receptores de cortisol es alta.) Y el parecido entre las respuestas hormonales y de comportamiento en las madres y sus hijos implica que la herencia genética podría predisponer a algunos individuos a reacciones de miedo exageradas, aunque no pueda descartarse la contribución de la propia experiencia.

Nadie puede afirmar hasta qué punto la actividad del sistema hipotalámico-hipofisario-suprarrenal controla otras regiones del cerebro que regulan la elección del comportamiento defensivo, y a su vez es controlado por ellas. Lo que no obsta para que hayamos comenzado a identificar los circuitos neuroquímicos o sistemas que en el cerebro afectan a diferentes conductas. Los dos sistemas que estudiamos con mayor detenimiento parecían tener, en un principio, funciones totalmente separadas. Pero el trabajo más reciente indica que los controles del comportamiento de defensa son algo más complicados que lo que inducían a suponer los primeros análisis.

Reunimos nuestros datos iniciales, obtenidos hace tres años, relativos al tratamiento de monos de edades entre 6 y 12 meses con dos clases diferentes de substancias neuroactivas —opiáceos (substancias parecidas a la morfina) y benzodiazepinas (substancias que incluyen el fármaco ansiolítico diazepam o valium). Elegimos los opiáceos y las benzodiazepinas porque las neuronas que captan o liberan esas substancias abundan en la corteza prefrontal, la amígdala y el hipotálamo. Se sabe que los opiáceos tienen sus correspondientes productos endógenos naturales (endorfinas y encefalinas), que ejercen la función de neurotransmisores; después de que ciertas neuronas liberen dichas substancias endógenas, se unen éstas a moléculas receptoras de otras neuronas, con lo que se refuerza o debilita la actividad de la célula nerviosa. Se han identificado receptores de benzodiazepinas, pero están todavía por aislar moléculas endógenas semejantes a las benzodiazepinas.

De nuevo expusimos a nuestros animales a situaciones de presencia displicente sin contacto ocular y de mirada sostenida. Administramos los fármacos antes de separar las crías de sus madres; registramos después el comportamiento. La morfina hizo descender el susurro que normalmen-



5. EL MACACO (*izquierda*), a escasa distancia de su madre, pone una cara de amenaza en un intento de mantener alejado al fotógrafo (el autor). El animal adecua su comportamiento a la gravedad y tipo de amenaza entre las nueve y doce semanas de edad, debido probablemente a ciertas vías neuronales de la corteza prefrontal, la amígdala y el hipotálamo, que alcanzan su madurez funcional durante ese período.

	SUSURRO	INMOVILIDAD	LADRIDO
MORFINA (OPIACEO)	DISMINUYE	SIN EFECTO	SIN EFECTO
NALOXONA (BLOQUEADOR DE OPIACEOS)	AUMENTA	SIN EFECTO	SIN EFECTO
DIAZEPAM (BENZODIAZEPINA)	SIN EFECTO	DISMINUYE	DISMINUYE

6. EFECTOS SOBRE EL SUSURRO, INMOVILIDAD Y GRUÑIDO causados por tres fármacos que actúan sobre las neuronas que responden a los opiáceos (*dos filas superiores*) o a las benzodiazepinas (*fila inferior*). Esos efectos se han evaluado en los últimos años. Nos indican los resultados que las vías del cerebro sensibles a los opiáceos controlan los comportamientos asociativos (aquellos con los que intenta que se acerque la madre, como pueden ser los ruidos de susurro), mientras que las vías sensibles a las benzodiazepinas controlan las respuestas ante amenazas inmediatas (inmovilidad absoluta y gruñido). Los datos recientes apoyan en líneas generales esta conclusión, aunque añaden cierta complejidad al cuadro.





7. UNA MADRE, EN ACTITUD RELAJADA (*izquierda*), apenas reacciona ante la presencia del autor con su cámara, mientras que otra, más sensible, se asusta (*derecha*). El autor mantiene la esperanza de que la exploración de las bases neuronales de esas diferencias que se dan en los monos facilite el desarrollo de nuevos medicamentos ansiolíticos.

te aparece en la situación de aislamiento y en la situación de mirada. La naloxona, por contra, aumentó el susurro. La naloxona se une a los receptores de opiáceos y bloquea la actividad de la morfina y de los opiáceos endógenos. Pero ni morfina ni naloxona ejercen influjo alguno en la frecuencia del gruñido provocado por la mirada desafiante y otros comportamientos hostiles; tampoco influyeron en la duración de la inmovilidad cuando no se establecía contacto ocular. De todo ello inferimos que las vías neuronales que hacen uso de los opiáceos regulan fundamentalmente los comportamientos afiliativos (así los inducidos por la angustia causada por la separación de la madre), pero estas vías parecen afectar muy poco a las respuestas ante amenazas directas.

La benzodiazepina que empleamos —el diazepam— produjo el cuadro contrario. El fármaco no afectó al susurro, pero redujo bastante la inmovilidad, los gritos y otros gestos hostiles. En breve, las vías que hacían uso de la benzodiazepina parecían influir sobre las respuestas ante amenazas directas, al tiempo que ejercían un efecto muy parco en el comportamiento afiliativo.

Seguimos pensando que las vías relacionadas con opiáceos y benzodiazepinas se hallan detrás de esas funciones diferentes. Pero el modelo elemental que habíamos imaginado en un principio ganó interés a la hora de trabajar con dos nuevos fármacos: el alprazolam (Xanax), que es una benzodiazepina, y la beta-carbolina, compuesto éste que se une a receptores de benzodiazepina, aumenta la ansiedad y produce unos efectos típicos opuestos a los del diazepam y sus derivados.

Cuando administramos el alprazolam en dosis que relajan la ansiedad en grado suficiente para aligerar la inmovilidad, esta substancia, lo mismo que el diazepam, redujo a un mínimo la hostilidad ante la amenaza en la situación de mirada retadora. La beta-carbolina elevó la hostilidad. No nos sorprendió. Sin embargo, y a diferencia de lo que ocurre con el diazepam, estos fármacos modulan el susurro, que habíamos considerado una conducta de afiliación (controlada por opiáceos) y sin relación con la amenaza (controlada con benzodiazepina). Más aún, ambos compuestos hicieron disminuir el susurro. Aunque no podemos explicar la semejanza del efecto, algo nos imaginamos sobre el modo en que los fármacos que actúan sobre los receptores de benzodiazepinas podrían influir en el susurro.

Cabría, en contra de nuestra primera manera de pensar, que las vías de la benzodiazepina regularan el comportamiento afiliativo. Nos inclinamos, sin embargo, por una segunda interpretación. El susurro que se presenta en la situación de mirada fija no sólo puede reflejar una necesidad afiliativa (un deseo del confort que proporciona la madre), sino que también puede ser una petición urgente inducida por una amenaza con la que se reclama una ayuda inmediata. Un mismo comportamiento podría servir, pues, para una doble función y hallarse controlado por dos vías distintas. (Esta conclusión se me corroboró con lo que observé mientras intentaba fotografiar a un pequeño macaco que había quedado separado de su madre en su hábitat natural. Su susurro intenso y persistente atrajo a la madre, junto con un grupo de protectores adicionales. La estrategia funcionó: puse pies en polvorosa.)

Nuestros estudios químicos nos hacen sospechar que los circuitos sensibles a los opiáceos y a las benzodiazepinas operan ambos durante el estrés; el grado relativo de actividad cambia con las características de la situación inquietante. En tanto en cuanto alteramos la participación de cada vía, en la misma proporción aparecerán los comportamientos.

Se desconoce la conducta de las neuronas en la vía de los opiáceos y en la vía de las benzodiazepinas; se ignora también la posibilidad de una mutua cooperación. Pese a todo ello, el escenario podría muy bien ser el siguiente: cuando una cría es separada de la madre, se inhiben las neuronas liberadoras de opiáceos y, por tanto, las sensibles a los mismos. Inhibición que despierta la añoranza de la madre y hace aflorar un sentimiendo de vulnerabilidad. Esta caída de actividad de las vías sensibles a los opiáceos posibilita que los sistemas motores cerebrales produzcan el susurro. Cuando un predador potencial aparece, las neuronas que segregan benzodiazepinas endógenas quedan en cierto grado inactivas. Este cambio conduce a una fuerte ansiedad y a la aparición de comportamientos y respuestas hormonales que acompañan al miedo. Conforme

aumenta el sentido de alarma, las áreas motoras preparan para la lucha o para la huida. El sistema de la benzodiazepina puede influir también sobre el sistema de los opiáceos, alterando el susurro durante las situaciones de amenaza.

Nos encontramos ahora dando los retoques necesarios a nuestro modelo de función cerebral. Sometemos a prueba la acción de otros compuestos que se unen a los receptores de opiáceos y de benzodiazepinas. Estamos examinando también las respuestas de comportamiento frente a substancias que, como el neurotransmisor serotonina, actúan sobre otros receptores. (Los receptores de serotonina se presentan en muchas regiones del cerebro que participan en la expresión del miedo.) Y estamos estudiando las actividades de substancias que controlan directamente la síntesis de hormonas de estrés, incluida la hormona liberadora de la corticotropina, distribuida por todo el cerebro y no sólo en el hipotálamo.

En colaboración con Richard J. Davidson, de la Universidad de Wisconsin, Shelton y yo hemos identificado una región del cerebro por lo menos en la que el sistema de la benzodiazepina ejerce sus efectos. Davidson había demostrado que la corteza prefrontal del hemisferio derecho era mucho más activa que en los niños hipercohibidos, por lo que nos preguntamos si también se daba esa asimetría en los monos atemorizados, y si los fármacos que reducen el comportamiento relacionado con el miedo en los animales amortiguaban la actividad frontal derecha.

Empleamos entonces, a modo de estrés, cierta represión suave. A tenor de lo previsto, el disparo neuronal fue más elevado en la corteza frontal derecha que en la izquierda. Cuando administramos el diazepam en dosis que sabíamos que apaciguaban la hostilidad, el fármaco devolvió la actividad eléctrica inducida por la represión a los valores normales. En otras palabras, el sistema de la benzodiazepina influía sobre la conducta de defensa a través, en parte, de su actuación sobre la corteza prefrontal derecha.

Estamos hablando de observaciones con alcance terapéutico. Si el cerebro del hombre y el del mono operan de manera similar, nuestros datos sugieren que las benzodiazepinas podrían ser más útiles en los adultos y niños que presentan una actividad eléctrica elevada en la corteza prefrontal derecha. En atención a los posibles efectos secundarios, muchos clínicos se muestran cautos a la hora de administrar a los niños una medicación ansiolítica durante un período prolongado. Pero la administración de este tipo de fármacos durante períodos críticos del desarrollo cerebral podrían ser suficientes para alterar el curso del desarrollo ulterior. Cabe admitir que el entrenamiento del comportamiento enseñe a los jóvenes hipercohibidos a regular sus sistemas sensibles a la benzodiazepina sin necesidad de medicación. Sin olvidar otra posibilidad: que el estudio de distintos compuestos que son útiles en el mono promueva el descubrimiento de nuevos fármacos eficaces para los niños. A medida que vaya saliendo a la luz el funcionamiento de otros sistemas neuroquímicos moduladores del miedo, podrían aplicarse nuevas estrategias semejantes para controlar tales circuitos.

El haber acotado estímulos que desencadenan tres tipos de conducta asociados con el miedo en el macaco nos ha permitido avanzar en nuestros conocimientos sobre el desarrollo y regulación de sus estrategias de defensa. Creemos que las vías dependientes de opiáceos y de benzodiazepina en la corteza prefrontal, la amígdala y el hipotálamo desempeñan una función decisiva en la determinación de la estrategia elegida. Buscamos ahora conocer el mecanismo en virtud del cual estos y otros circuitos nerviosos cooperan entre sí. Hemos puesto ya las bases que permitirán descifrar las contribuciones relativas de los diversos sistemas cerebrales que originan un miedo desmesurado en el hombre. Se entrevé ya el momento en el que los tratamientos podrán diseñarse de modo que normalicen las vías específicas de señalización alteradas en el niño, salvándole de una profunda infelicidad a lo largo de su vida.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

STRESS AND COPING IN EARLY DEVELOPMENT. Jerome Kagan en *Stress, Coping, and Development in Children*. Dirigido por N. Garmezy y M. Rutter. McGraw-Hill, 1983.

DEFENSIVE BEHAVIORS IN INFANT RHESUS MONKEYS: ENVIRONMENTAL CUES AND NEUROCHEMICAL REGULATION. Ned H. Kalin y Steven E. Shelton en *Science*, vol. 243, págs. 1718-1721; 31 de marzo de 1989.

EL ESTRÉS EN LOS ANIMALES. Robert M. Sapolsky en *Investigación y Ciencia*, págs. 68-75, marzo de 1990.

DEFENSIVE BEHAVIORS IN INFANT RHESUS MONKEYS: ONTOGENY AND CONTEXT-DEPENDENT SELECTIVE EXPRESSION. N. H. Kalin, S. E. Shelton y L. K. Takahashi en *Child Development*, vol. 62, n.º 5, págs. 1175-1183; octubre de 1991.

Dirac y la belleza de la física

Prefería la teoría bella a la corroborada con hechos pero fea porque, advertía, los hechos cambian. Ello le llevó a predecir la existencia de antimateria

R. Corby Hovis y Helge Kragh

A los físicos distinguidos que visitan la Universidad de Moscú se les pide que dejen en cierta pizarra una sentencia para la posteridad. Niels Bohr, el padre de la teoría cuántica del átomo, escribió allí la divisa de su famoso principio de complementariedad: "*Contraria non contradictoria sed complementa sunt*" ("los contrarios no son contradictorios sino complementarios"). Hideki Yukawa, el pionero de la moderna teoría de las fuerzas nucleares fuertes, grabó con tiza la frase: "La naturaleza es, por esencia, simple." Paul Adrien Maurice Dirac eligió el epígrafe: "Una ley física tiene que poseer belleza matemática."

Hace exactamente 30 años Dirac escribía en *Scientific American*: "Dios es un matemático de muy alta categoría, y al construir el universo se ha servido de matemáticas muy avanzadas." Inspirado por las concepciones de Albert Einstein y Hermann Weyl, Dirac llegó a preocuparse, más que cualquier otro físico moderno, de la idea de "belleza matemática" como rasgo intrínseco de la naturaleza y como guía metodológica para su investigación científica. "Una teoría con belleza matemática es más probablemente correcta que otra fea, aunque ésta case con unos cuantos datos experimentales", aseguraba.

La preocupación de Dirac por la estética y la lógica de la física matemática, junto con su reticencia e introversión legendarias han hecho de él una de las figuras más enigmáticas entre los grandes científicos del siglo XX. Desgraciadamente, su racionalismo exagerado parece haberle conducido también a desviaciones estériles, tras unos años iniciales de éxito asombroso. Entre los 23 y los 31 años Dirac descubrió una original y potente formulación de la mecánica cuántica, una teoría cuántica de la emisión y absorción de radiación por los átomos (una versión primitiva pero importante de la electrodinámica cuántica), la ecuación de ondas relativista para el electrón, la idea de antipartícula y una teoría de monopolos magnéticos. Con todo, muy pocas de sus contribuciones ulteriores tuvieron valor perdurable, y ninguna el carácter revolucionario de su obra inicial.

R. CORBY HOVIS y HELGE KRAGH han colaborado desde 1987 en varios proyectos de historia de la física moderna. Hovis trabaja en el centro de física de radiaciones e investigación espacial de la Universidad de Cornell. Kragh enseñó historia y física en Cornell de 1987 a 1989.

Dirac había nacido en 1902 en Bristol, como el segundo de tres hijos, en el seno de una familia que hoy tildaríamos de disfuncional. La calamidad de la familia era su cabeza, Charles Adrian Ladislas Dirac, que había emigrado de Suiza a Inglaterra hacia 1890, y había encontrado y tomado por esposa allí a Florence Hannah Holten, la hija de un capitán de barco. Charles se ganaba la vida enseñando su lengua nativa, el francés, en el Instituto Técnico Merchant Venturers' de Bristol, en el que fue tristemente famoso por imponer una rígida disciplina. El hogar Dirac era gobernado por él según los mismos principios de organización militar. Obviando toda manifestación de sentimientos e identificando amor paterno con disciplina, aprisionó a sus hijos en una tiranía doméstica que les aisló de la vida social y cultural. No pudiendo o no queriendo sublevarse, Paul se refugió en la seguridad del silencio y se distanció de su padre. Esos años de infelicidad le marcaron para toda la vida. Al morir Charles Dirac en 1936, Paul no se afligió. "Me siento ahora mucho más libre", le escribía a su mujer.

Paul poseía un rico mundo interior donde refugiarse. A una edad muy temprana mostró su aptitud por las matemáticas. A los 12 años se inscribió en el Merchant Venturers', centro que, a diferencia de la mayoría de los demás de su tiempo, no ofrecía una educación clásica en latín y griego, sino un plan de estudios moderno, con ciencias, lenguas modernas y oficios. Estos estudios se adecuaban muy bien a Dirac, pues, según él mismo dijo, "no apreciaba el valor de las culturas antiguas". Una vez acabado este programa de nivel secundario, pasó a otra institución ubicada en los mismos edificios, la escuela de ingeniería de la Universidad de Bristol. Allí se preparó en la especialidad de electricidad, no por tener gran interés en la ingeniería, sino por creer que eso daría gusto a su padre.

El plan de estudios de ingeniería excluía toda materia que no fuese física aplicada o matemáticas. A pesar de estas omisiones, Dirac sintió la fascinación y obtuvo pronto el dominio de las nuevas teorías einsteinianas del espacio, el tiempo y la gravitación —las teorías de la relatividad especial y general.

Cuando Dirac se graduó en 1921, con las máximas clasificaciones, la depresión económica de la posguerra parecía que iba a dejarle sin trabajo. Le salvó una beca para estudiar matemáticas en Bristol, tras la cual, en el otoño de 1923, comenzó sus estudios de posgrado de matemáticas y física teórica en la Universidad de Cambridge, constituida por entonces en centro de científicos consumados (Joseph Larmor, J. J. Thomson, Ernest Rutherford, Arthur Stanley Eddington y James Jean) y de jóvenes estrellas (James Chadwick, Patrick Blackett, Ralph Fowler, Edward Milne, Douglas R. Hartree y Peter Kapitza). A Dirac se le asignó Fowler como director de

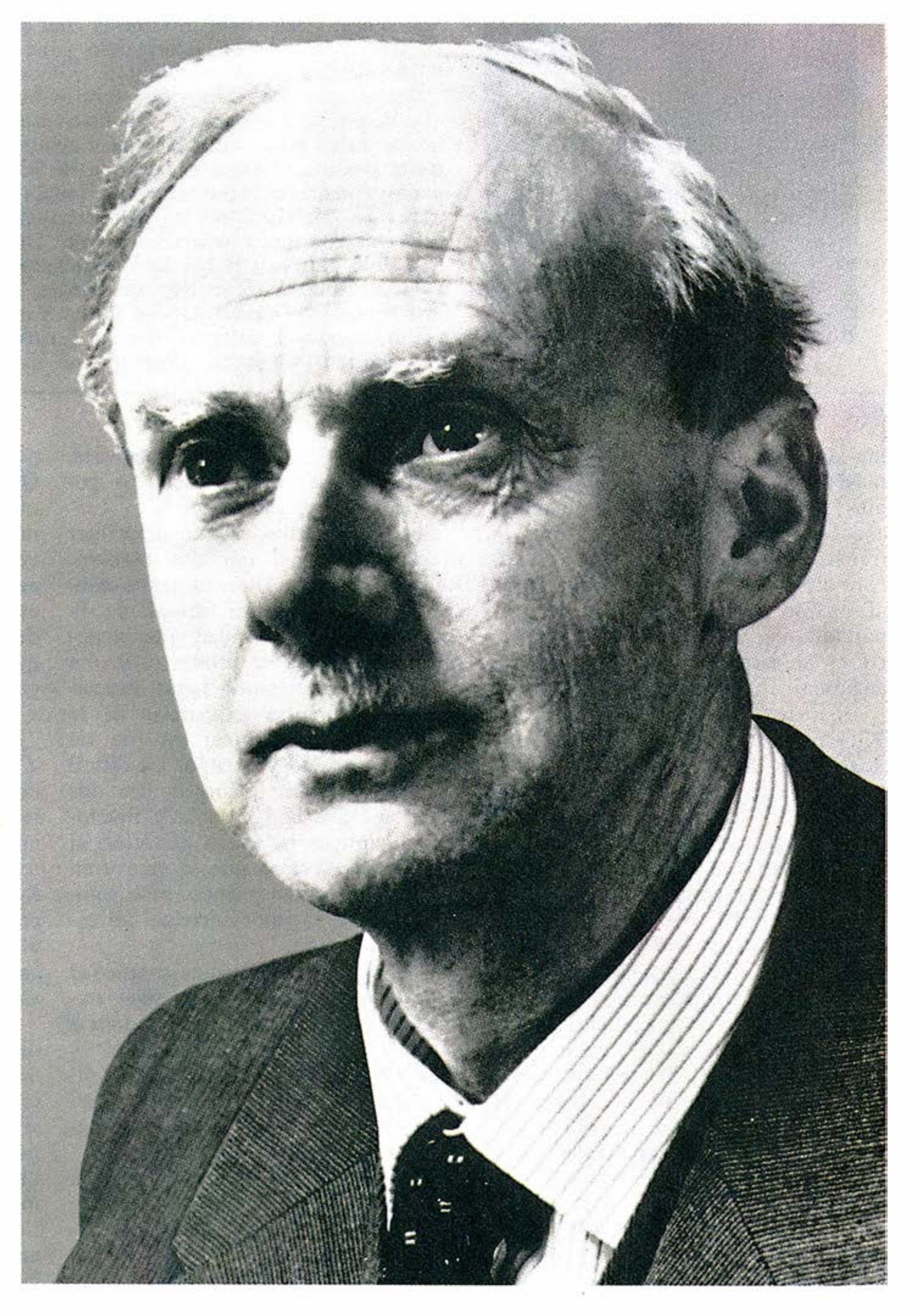
tesis, y de él aprendió teoría atómica y mecánica estadística, materias que no había estudiado anteriormente. De estos días recordará más tarde: "Me encerraba totalmente en el trabajo científico, y perseveraba en él muy a gusto día tras día, excepto los domingos, en que descansaba y, si el tiempo era bueno, me daba un largo paseo solitario por el campo."

A los seis meses de su llegada a la universidad, publicaba Dirac su primer artículo científico, y en los dos años siguientes publicó 10 más. Al momento de concluir su tesis doctoral, en mayo de 1926, había descubierto una formulación original de la mecánica cuántica, y había impartido un curso de mecánica cuántica, el primero ofrecido en una universidad británica. Al cabo de sólo 10 años de pisar Cambridge, recibirá el Nobel de física, por su "descubrimiento de nuevas y fructuosas formulaciones de la teoría de los átomos... y por sus aplicaciones".

Los ocho años de esplendor de Dirac comenzaron un buen día del mes de agosto de 1925, en el que recibió de Fowler las pruebas de imprenta de un artículo aún no publicado de Werner Heisenberg, un joven físico teórico alemán. El artículo trazaba las bases matemáticas de una revolucionaria teoría de los fenómenos atómicos, que será pronto conocida como "mecánica cuántica". Dirac se dio cuenta inmediatamente de que el trabajo de Heisenberg abría una vía enteramente nueva de contemplar el mundo a una escala ultramicroscópica. Durante el año siguiente reformuló la intuición básica de Heisenberg, estableciendo una teoría original de la mecánica cuántica, que fue conocida como álgebra de "números-*q*", por denominar así Dirac las magnitudes físicas "observables", tales como posición, momento o energía.

Aunque este trabajo le ganó pronto a Dirac un reconocimiento internacional, muchos de sus resultados habían sido obtenidos simultáneamente por un potente grupo de físicos teóricos que trabajaban en Alemania, entre ellos Heisenberg, Max Born, Wolfgang Pauli y Pascual Jordan. Dirac competía abiertamente con ellos. Born, Heisenberg y Jordan elaboraron el esquema inicial de Heisenberg mediante el álgebra de matrices. Luego, en la primavera de 1926, el físico austríaco Erwin Schrödinger elaboró otra teoría cuántica, la mecánica ondulatoria, que conducía a los mismos resultados que las teorías más abstractas de Heisenberg y Dirac, y se prestaba más fácilmente al cálculo. Muchos físicos sospechaban que esos tres sistemas eran meras representaciones particulares de una teoría más general de la mecánica cuántica.

Durante una estancia de seis meses en el Instituto de Física Teórica de Copenhague, Dirac encontró esa teoría general que tantos investigadores habían esperado —un siste-



1. "ERA ALTO, macilento, desmañado y extremadamente taciturno", escribió el físico y biólogo alemán Walter Elsasser. "Había logrado que todo lo que en él había se pusiese en un solo afán. Era hombre de altísima categoría en un campo, pero al que había quedado poco interés y competencia para otras actividades humanas... En otras palabras, era el prototipo de mente matemática superior. Mientras que en otros ésta había coexistido con una multitud de intereses, en el caso de Dirac todo confluía hacia la realización de su gran misión histórica, el establecimiento de la nueva ciencia, la mecánica cuántica, a la que probablemente contribuyó como el que más."

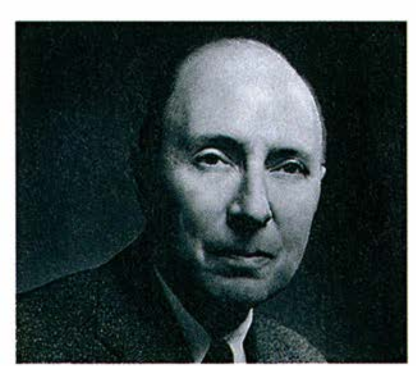
Hechos memorables

En 1931, siendo profesor en Cambridge, **Nevill Mott** escribía a sus padres: "Dirac se parece mucho a la idea que nos hemos formado de Gandhi. Le hemos tenido aquí a cenar... Ha sido una cenita estupenda, pero estoy seguro de que no le habría preocupado si no le hubiéramos dado más que 'porridge' (gachas de avena). Se va a Copenhague por la ruta del mar del Norte porque piensa que debe curarse a sí mismo de los mareos en barco. Es totalmente incapaz de aparentar que piensa algo que realmente no piense. En la época de Galileo habría sido un mártir muy satisfecho." Dirac asistió una vez a un almuerzo con **Eugene Wigner** y **Michael Polanyi**. Se entabló allí una viva discusión sobre ciencia y sociedad, durante la cual Dirac no dijo una palabra. Interpelado para que interviniera y diera su opinión, respondió: "Siempre hay más gente dispuesta a hablar que dispuesta a escuchar." Un físico francés que a duras penas hablaba inglés acudió en cierta ocasión a visitarle. Dirac le escuchaba pacientemente mientras el pobre hombre se esforzaba por encontrar las palabras inglesas correctas con que exponer su asunto. En ese momento entró en la habitación su hermana y le preguntó a Dirac algo en francés, a lo que él contestó también en un fluido francés. Naturalmente el visitante se puso furioso, y le preguntó indignado: ¿Por qué no me ha dicho que sabía francés? Contestación concisa de Dirac: "Usted nunca me lo preguntó."

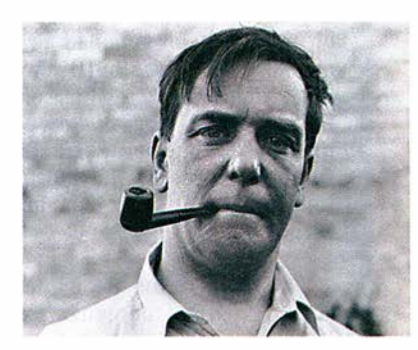
Cuando Dirac pasó por Berkeley camino del Japón en 1934, **J. Robert Oppenheimer** salió a su encuentro y le ofreció dos libros que le ocuparan durante el viaje. Dirac cortésmente los rechazó, diciendo que el leer libros impide pensar. Una vez el físico ruso **Peter Kapitza** dio a Dirac una traducción inglesa de *Crimen y castigo*, de Fëdor Dostoevski. Pasado cierto tiempo, Kapitza le preguntó si había disfrutado. A lo que respondió: "Es un libro bonito, pero en uno de los capítulos el autor comete un error. Describe el sol saliendo dos veces en un mismo día."



J. Robert Oppenheimer



Eugene Wigner



Peter Kapitza

ma que subsumía todos los esquemas particulares y proporcionaba reglas definidas para transformar un esquema en otro. Esta "teoría de transformaciones" de Dirac, junto con otra teoría semejante elaborada al mismo tiempo por Jordan, proporcionó la base de todos los ulteriores desarrollos de la mecánica cuántica.

El 26 de diciembre de 1927 el físico inglés Charles G. Darwin (nieto del famoso naturalista) escribía a Bohr: "He estado en Cambridge hace pocos días y he visto a Dirac. Acaba de obtener un sistema de ecuaciones completamente nuevo para el electrón, que proporciona el espín correcto en todos los casos, y parece ser 'la cosa'. ¡Sus ecuaciones son ecuaciones diferenciales de primer orden, y no de segundo!"

La ecuación de Dirac para el electrón era realmente "la cosa", pues satisfacía inmediatamente las exigencias de la teoría especial de la relatividad, y daba cuenta del "espín" del electrón experimentalmente observado, que puede tomar uno de los dos valores, +1/2 o —1/2, "arriba" o "abajo". La ecuación original de Schrödinger no había logrado hacer esto, porque no era relativista, y su extensión relativista, la ecuación de Klein-Gordon, no podía dar cuenta del espín.

El uso de derivadas sólo de primer orden era crucial por dos razones. En primer lugar, Dirac deseaba conservar la estructura formal de la ecuación de Schrödinger, que contenía una derivada de primer orden en el tiempo. En segundo lugar, necesitaba satisfacer las exigencias de la relatividad, que ponen en pie de igualdad espacio y tiempo. La difícil reconciliación diraquiana de los dos criterios era a la vez bella y funcional: al aplicar la nueva ecuación al caso de un electrón que se mueve en un campo electromagnético, salía automáticamente el valor correcto del espín del electrón.

Esta deducción de una propiedad a partir de primeros principios impresionó a los físicos, que aludían a la ecuación como "un milagro" y "una absoluta maravilla", y se dedicaban a analizar sus sutilezas. Esta línea de investigación condujo al nacimiento del análisis espinorial —potente herramienta matemática para analizar problemas de prácticamente todas las ramas de la física— y condujo también al desarrollo de la ecuación de ondas relativista para partículas con espín distinto de 1/2. Otro éxito consistió en que Dirac y otros, aplicando esta ecuación al átomo de hidrógeno, lograron reproducir exactamente las líneas observadas en su espectro. Al cabo de un año escaso de su publicación, la ecuación de Dirac se había convertido en lo que sigue siendo hoy: una piedra angular de la física moderna.

Además de adorador de la lógica matemática, Dirac era maestro consumado de la intuición. Estos rasgos intelectuales de contradictoria apariencia destacaron, más que en ningún otro asunto, en su desarrollo de la teoría de los "agujeros" entre 1929 y 1931. Con dicha teoría alumbró todo un mundo que había escapado al conocimiento de los físicos.

La teoría surgió cuando Dirac se dio cuenta de que su ecuación no sólo tenía soluciones correspondientes a los electrones de energía positiva, sino también otras correspondientes a electrones de energía negativa. Tales partículas deberían mostrar propiedades muy peculiares. Además, las partículas de energía positiva deberían ir cayendo constantemente a esos estados de

Porque se lo aconsejaron, leyó también *Guerra y paz* de Leo Tolstoi; tardó dos años en acabar la novela.

Dirac rehuía la publicidad. En un primer momento, se sintió tentado de no aceptar el Nobel. El día en que se anunció su nombramiento para la cátedra Lucasiana, se escapó al zoo para evitar las muchas felicitaciones. Rechazó todos los doctorados *honoris causa* —por más que se le otorgaran muchos en su ausencia, y por lo que parece sin su aceptación.

Alrededor de 1950 se le asignó la tutoría del doctorado en Cambridge de **Dennis Sciama**. Cierto día, entró éste entusiasmado en el despacho de Dirac: "Profesor, se me acaba de ocurrir un método de relacionar la formación de las estrellas con las cuestiones cosmológicas. ¿Quiere que se lo cuente?" Respuesta de Dirac: "No." Se acabó la conversación. Parece que Dirac no se daba cuenta de que su brevedad y franqueza podía percibirse como descortesía o insolencia. En sus clases se esforzaba por presentar su manual con la máxima lucidez y claridad. Consideraba absurdo modificar esas frases cuidadosamente elegidas sólo porque no hubiesen sido entendidas. Más de una vez alguien de la audiencia le pidió repetir un pasaje que no se había entendido, dando a entender que le agradaría oír una aclaración ulterior. En tales casos Dirac repetía exactamente lo que acababa de decir, usando las mismísimas palabras.

Escribía en 1977: "De todos los físicos que he conocido, creo que ninguno me ha parecido más estrechamente semejante a mí ,que **Schrödinger**. Con él me ponía de acuerdo antes que con ningún otro. Creo que la razón de ello es que Schrödinger y yo teníamos en común un enorme aprecio por la belleza matemática... Para nosotros era una especie de acto de fe que cualesquiera ecuaciones que describan leyes fundamentales de la naturaleza tienen que encerrar en sí una gran belleza matemática."



Erwin Schrödinger

energía negativa, ¡provocando así el derrumbe de nuestro mundo circundante!

A finales de 1929 encontró una escapatoria al enigma creado por la aparente necesidad de que se den en la naturaleza electrones de energía negativa. Imaginó que el vacío constituía un "mar" uniforme de estados de energía negativa, todos llenos de electrones. Puesto que el principio de exclusión de Pauli prohíbe que dos electrones ocupen el mismo estado cuántico, los electrones de energía positiva se mantendrían por encima del mar invisible, formando los estados "excitados" que observamos en la naturaleza. Un estado excitado podría crearse también inyectando suficiente energía positiva para extraer del mar un electrón, proceso que dejaría un "agujero" en el que podría caer otro electrón de energía negativa. "Estos agujeros serían objetos de energía positiva, y por consiguiente serían en este respecto semejantes a las partículas ordinarias", escribía Dirac a principios de 1930.

Pero, ¿con qué partícula podría identificarse un agujero? En aquel tiempo, dos eran los candidatos imaginables, y ambos fueron considerados por Dirac: el protón y el electrón positivo. Su primera elección, el protón, se enfrentó casi inmediatamente con dos serias dificultades. En primer lugar, era de suponer que un electrón podría caer ocasionalmente dentro de un agujero y llenarle, en cuyo caso ambos se aniquilarían produciendo un destello de luz (rayos gamma). Pero tales aniquilaciones protón-electrón no se habían observado nunca. En segundo lugar, resultaba evidente que el candidato correcto tenía que ser idéntico al electrón en todos los aspectos, salvo en la carga eléctrica; sin embargo, la masa del protón, como era bien sabido, multiplicaba unas 2000 veces la del electrón.

Con todo, llevado del deseo de simplicidad, Dirac estaba a favor del protón como agujero. En 1930 electrón y protón eran las únicas partículas fundamentales conocidas, y no le apetecía lo más mínimo introducir una entidad nueva e inobservada. Además, si los protones podían ser interpretados como estados de energía negativa no ocupados por electrones, el número de partículas elementales se reducía a una, el electrón. Tal simplificación era "el sueño de los filósofos", según declaraba Dirac.

Pero las objeciones a esa interpretación inicial de los agujeros resultaron pronto abrumadoras, y en mayo de 1931 Dirac se decidió, a su pesar, por el segundo candidato a agujero, el antielectrón: "un nuevo tipo de partícula, desconocido de la física experimental, que tiene la misma masa que el electrón y carga opuesta". La total simetría en esta teoría entre cargas positivas y negativas le impulsó a admitir también el antiprotón en el ámbito de la existencia teórica. Dirac doblaba así el número de partículas elementales que había de admitirse, y fijaba las bases para especular sobre mundos enteros hechos de antimateria.

Dirac defendía también la existencia de otra partícula hipotética, el monopolo magnético, que tendría una carga magnética aislada, como tienen carga eléctrica el electrón o el protón. Ni aun hoy contamos con una prueba experimental concluyente en favor de los monopolos.

En septiembre de 1932 fue elegido para la cátedra Lucasiana de Cambridge, la famosa cátedra de matemáticas que en su tiempo había ocupado Newton durante 30 años, y en la que Dirac permanecerá 37 años (actualmente la ocupa Stephen W. Hawking). Ese mismo mes, Carl D. Anderson, un joven físico experimental del Instituto de Tecnología de California, enviaba a *Science* un artículo en el que describía la detección, en los rayos cósmicos, de "una partícula cargada positivamente que poseía una masa comparable a la del electrón". Aunque el descubrimiento no estaba en modo alguno inspirado por la teoría de Dirac, la nueva partícula, apodada "positrón", será universalmente identificada con el antielectrón de Dirac. En diciembre de 1933, al recibir su premio Nobel en Estocolmo, Dirac a los 31 años daba su conferencia sobre la "Teoría de electrones y positrones". Tres años después Anderson, también de 31 años, recibía el premio Nobel por haber sacado la partícula de Dirac del ámbito de lo hipotético.

La electrodinámica cuántica (EDC) es el nombre dado a la teoría cuántica del campo electromagnético. Hacia mediados de los años 30, los intentos de formular una teoría cuántica de campos relativista satisfactoria habían alcanzado una situación de crisis, y muchos físicos llegaban a la conclusión de que era necesario cambiar drásticamente ideas físicas fundamentales. Dirac había

hecho contribuciones pioneras a la EDC al final de los años 20, y se dolía de los defectos del esquema teórico existente, construido en torno a una teoría propuesta por Heisenberg y Pauli en 1929. Dirac llamaba a esa teoría ilógica y "fea". Además, los cálculos realizados con ella conducían a integrales divergentes —infinitos— a las que no cabía atribuir ningún sentido físico. En 1936, Dirac elaboró una teoría alternativa en la que no se conservaba la energía. Aunque esta propuesta radical fue pronto refutada por los experimentos, Dirac siguió criticando la teoría de Heisenberg-Pauli, y buscando —casi obsesivamente— una mejor. En una mirada retrospectiva a su carrera, escribía en 1979: "Me he pasado la vida intentando sobre todo encontrar ecuaciones mejores para la electrodinámica cuántica, hasta ahora sin éxito, pero continúo trabajando en ello."

Un camino lógico hacia una EDC mejor consistiría en utilizar, como trampolín, una teoría clásica del electrón más perfecta. En 1938 Dirac siguió esta estrategia, y construyó una teoría del electrón clásico-relativista, que perfeccionaba mucho la antigua teoría elaborada por H. A. Lorentz a principios de siglo. La teoría de Dirac daba como resultado una ecuación de movimiento exacta para el electrón, tratado como partícula puntual. Puesto que la teoría eliminaba los infinitos y los términos mal definidos, parecía plausible que condujera a una EDC libre de divergencias. Pero el crear una versión mecánico-cuántica satisfactoria de la teoría clásica resultó ser más engorroso de lo que Dirac había previsto. Luchó —en vano— con este problema a lo largo de más de 20 años.

Durante el bienio 1947-1948 surgió una nueva teoría de EDC que resolvía, en un sentido práctico, la dificultad de los infinitos que habían arruinado anteriormente los cálculos. Los iniciadores de la nueva teoría —Sin-itiro Tomonaga en Japón, y Richard Feynman, Julian Schwinger y Freeman Dyson en Estados Unidos— propusieron un procedimiento de "renormalización", en el que los infinitos que resultaban en los cálculos teóricos se reemplazaban por expresiones de los valores de la masa y la carga del electrón experimentalmente medidos. Este procedimiento de sustraer cantidades (de hecho) infinitas permitía hacer predicciones enormemente precisas, y los muchos triunfos experimentales de la teoría convencieron a los físicos de que la renormalización debía aceptarse como *el* método de hacer EDC.

Dirac, sin embargo, se resistió a aceptar el método de renormalización, juzgándole tan "complicado y feo" como el viejo de Heisenberg y Pauli. Una teoría que opera con trucos matemáticos *ad hoc* no dictados directamente por principios físicos básicos —argüía— no puede ser buena, por bien que concuerde con los resultados experimentales. Pero sus objeciones solían dejarse de lado. Al final de su vida no tuvo más remedio que admitir, no sólo que se había quedado aislado en la comunidad científica, sino también que ninguna de sus muchas propuestas para reconstruir la EDC había tenido éxito.

La lucha de Dirac por una teoría cuántica de campos distinta obtuvo, no obstante, algunos subproductos valiosos. Uno de ellos fue la importante teoría clásica del electrón antes mencionada. Otro fue una notación para la mecánica cuántica conocida como el formalismo de "bras" y "kets" (del inglés "bracket", paréntesis), que introducía elegantemente en la física cuántica las potentes matemáticas de espacios vectoriales (o "espacios de Hilbert", como se les designa a veces). Este formalismo se difundió ampliamente a través de la tercera edición (1947) de su prestigioso libro de texto *Principios de mecánica cuántica*, y ha sido desde entonces el lenguaje matemático preferido para este tema.

Por lo general, Dirac sólo había trabajado en áreas de la teoría cuántica muy especializadas. Resultó por ello algo sorprendente que en 1937 se aventurara a entrar en la cosmología con una idea nueva, y que luego la desarrollara hasta obtener un modelo concreto de universo. Su interés por este tema había sido inspirado en gran parte por dos de sus antiguos profesores de Cambridge, Milne y Eddington, y por discusiones con un brillante joven astrofísico indio, Subrahmanyan Chandrashekhar, cuyo trabajo de doctorado en Cambridge había dirigido en parte Dirac. Al principio de los años 30, Eddington se había embarcado en un programa de investigación ambicioso y heterodoxo, que pretendía deducir las constantes fundamentales de la naturaleza enlazando teoría cuántica y cosmología. Esta búsqueda de una "teoría fundamental", según la llamaba Eddington, extendió la investigación racional hasta introducirla en el ámbito de la especulación metafísica —produciendo, según acusaba un crítico, una "combinación de parálisis de la razón con intoxicación de la fantasía". Dirac era escéptico respecto a las pretensiones imaginativas de Eddington, pero estaba impresionado por su filosofía de la ciencia, que subrayaba la potencia de un razonamiento puramente matemático, y por su idea de una conexión fundamental entre el microcosmos y el macrocosmos.

En su primer artículo sobre cosmología, Dirac concentraba la atención en los números "puros" (o sin dimensiones físicas) muy grandes que pueden construirse mediante combinación algebraica de constantes

It seems reasonable to assume that not all the states of negative energy are occupied, but that there are a few vacancies or 'holes', which can be described by a wave function, like an X-ray orbit. Such a hole would appear experimentally as a thing with +ve energy, since to make the hole disappear (i.e. to fill it up,) one would have to put −ve energy into it. Further, one can easily

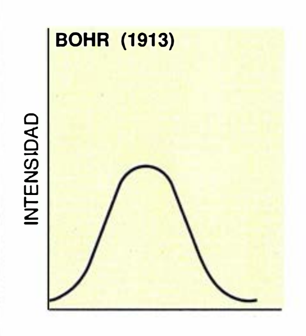
2. EL CONCEPTO DE ANTIMATERIA, que introdujo Dirac en 1931, surgía directamente de su teoría de los "agujeros", bosquejada aquí en una carta a Niels Bohr con fecha 26 de noviembre de 1929, que ilustra, en pulcra escritura, la claridad y concisión que le definían.

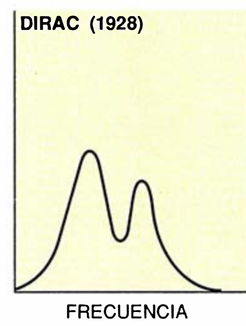
físicas fundamentales (como la constante de gravitación, la constante de Planck, la velocidad de la luz, y las cargas y masas de electrón y protón), de forma que sus unidades de medida se cancelen en la división. Sostenía que sólo esos grandes números tenían significado profundo en la naturaleza.

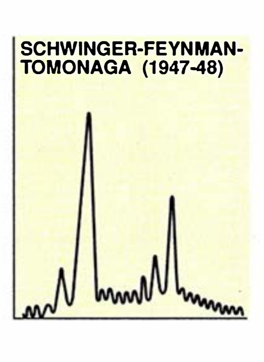
Por ejemplo, era bien sabido que la razón de la fuerza eléctrica entre un protón y un electrón a la fuerza gravitacional entre esas dos mismas partículas es un número muy grande, del orden de 10^{39}. Es curioso, notaba Dirac, que este número se aproxime a la edad del universo (tal como era estimada entonces), si esta edad se expresa mediante una unidad de tiempo apropiada, como es el tiempo que necesita la luz para atravesar el diámetro de un electrón.

Predicciones de la raya alfa del hidrógeno

La raya alfa del espectro de hidrógeno ilustra bien los avances de la teoría atómica desde que Niels Bohr la explicara en 1913 como el resultado de una sola transición cuántica. Cuando experimentos más perfeccionados revelaron una estructura fina en esa raya, Arnold Sommerfeld combinó la teoría atómica de Bohr con la teoría de la relatividad especial de Einstein para explicar las componentes de la raya como resultado de transiciones distintas. Los intentos de derivar el resultado de Sommerfeld a partir de la nueva mecánica cuántica fracasaron hasta 1928, cuando la teoría del electrón de Dirac logró mostrar que reproducía exactamente la vieja ecuación de Sommerfeld. Medidas ulteriores demostraron una estructura todavía más fina, que recibió justificación teórica en las postrimerías de los años cuarenta, a través de la moderna electrodinámica cuántica de Julian Schwinger, Richard Feynman y Sin-itiro Tomonaga. A Dirac no le gustaba esta nueva teoría, porque no era, decía, "más que un conjunto de reglas que funcionan", no una verdadera teoría edificada sobre una base "firme y bella".







Dirac sabía de varias correlaciones de este tipo entre números puros grandes, pero en vez de considerarlas meras coincidencias, mantenía que constituían la esencia de un nuevo e importante principio cosmológico, que bautizó como la Hipótesis de los Grandes Números: "Dos cualesquiera de los números muy grandes sin dimensiones que ocurren en la naturaleza estarán conectados por una relación matemática simple en la que los coeficientes son del orden de magnitud de la unidad."

A partir de este principio, Dirac concluía fácilmente —y en forma muy discutible— que la "constante" gravitacional G es inversamente proporcional a la edad del universo, y por tanto ha de estar disminuyendo continuamente con el tiempo cósmico.

Hacia 1938 Dirac había derivado diversas consecuencias empíricamente contrastables de la Hipótesis de los Grandes Números, y había bosquejado su propio modelo de universo, basado en ese principio. Pero la mayoría de los físicos y astrónomos —que comenzaban a estar muy molestos por ese planteamiento racionalista de la cosmología— desecharon sus ideas. Sólo décadas más tarde, en los años setenta, volvería Dirac a ocuparse de la cosmología, principalmente a partir de su teoría original. Defendió su Hipótesis de los Grandes Números y su predicción de una constante gravitacional variable, contra las objeciones basadas en observaciones, e intentó modificar su modelo para acomodarlo a nuevos descubrimientos, como las microondas de la radiación cósmica de fondo. Sus esfuerzos no llegaron a obtener reconocimiento, y se convirtió —en cosmología como en EDC— en una figura distanciada de la corriente central de investigación.

Dirac estaba casado con su trabajo, y sus colegas le habían tenido desde siempre por un solterón empedernido. Por eso produjo una enorme sorpresa que en 1937 tomase por esposa a Margit Wigner, hermana del famoso físico húngaro Eugene Wigner. Margit era viuda, con un hijo y una hija de su matrimonio anterior; de Paul tuvo dos niñas. No es de extrañar que éste permaneciera distanciado de la vida familiar. "Es la ironía de la vida: Paul sufrió terriblemente por parte de su padre y éste había tenido con su familia las mismas dificultades que él", ha escrito Margit. "Paul, aunque no fuera un padre dominante, se mantuvo excesivamente apartado de sus hijos. Que la historia se repite, es la mayor de las verdades en la familia de Dirac."

Dirac no mostró nunca interés por el arte, la música o la literatura, y rara vez fue al teatro. Las únicas aficiones a las que dedicó mucho tiempo eran caminatas por la montaña y viajes. Era un caminante infatigable, y en las excursiones demostraba con frecuencia una resistencia que asombraba a los que sólo le conocían de congresos y convites. Sus viajes le llevaron a dar por tres veces la vuelta al mundo, y escaló algunos de los más altos picos de Europa y América.

En septiembre de 1969 Dirac se jubiló de su cátedra Lucasiana. Al año siguiente decidió con Margit trasladarse de Inglaterra al templado clima de Florida, donde aceptó un puesto de profesor en la universidad del estado en Tallahassee, ciudad donde falleció en octubre de 1984.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE HISTORICAL DEVELOPMENT OF QUANTUM THEORY, Vol. 4, Parte 1: THE FUNDAMENTAL EQUATIONS OF QUANTUM MECHANICS, 1925-1926. Jagdish Mehra y Helmut Rechenberg. Springer-Verlag, 1982.

PAUL ADRIEN MAURICE DIRAC. R. H. Dalitz y Sir Rudolf Peierls en *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, vol. 32, págs. 137-185; 1986.

REMINISCENCES ABOUT A GREAT PHYSICIST: PAUL ADRIEN MAURICE DIRAC. Dirigido por Behram N. Kursunoglu y Eugene P. Wigner. Cambridge University Press, 1987.

DIRAC: A SCIENTIFIC BIOGRAPHY. Helge Kragh. Cambridge University Press, 1990.

COSMOS INCONSTANTE

Corey S. Powell



Telescopios instalados en el espacio, dotados con visión de rayos X y rayos gamma, observan un universo dinámico, nunca en reposo.

El *Observatorio Compton de Rayos Gamma*, de la Administración Nacional norteamericana para la Astronáutica y el Espacio (NASA), y el *Satélite Roentgen*, que es un proyecto conjunto de los EE.UU., el Reino Unido y Alemania, —en la jerga, *GRO* y *ROSAT*, respectivamente— nos ofrecen información sobre objetos emisores de rayos X y gamma. Las radiaciones de rayos X y de rayos gamma constituyen las formas de radiación electromagnética más poderosas: un rayo X porta de centenares a decenas de miles de veces más energía que un fotón de luz visible, y aún más un rayo gamma. "Cuando miras el firmamento a altas energías, ves un mundo de sorprendente variabilidad", comenta Neil Gehrels, responsable del *GRO*. En tiempos cuyas escalas van de semanas a milésimas de segundo, los objetos celestes emisores de rayos X y gamma intensifican su brillo y lo atenúan, parpadean y oscilan. De estos cambios tan rápidos se sigue que las fuentes de radiación han de ser minúsculas en la escala cósmica; pues, si así no fuera, se tardaría muchísimo en verse afectada buena parte de la región emisora ante cualquier cambio físico. Pero lo cierto es que irradian enormes cantidades de energía.

Los astrónomos creen saber qué se esconde tras muchas de estas imprevisibles balizas cósmicas: un agujero negro, es decir, una masa colapsada tan densa que nada, ni siquiera la luz, puede escapar de su gravedad. Un agujero negro de la masa del sol tendría sólo unos seis kilómetros de diámetro. El agujero no puede producir de suyo ningún tipo de radiación, pero sí puede hacerlo la materia que merodee por su entorno. Los cálculos teóricos muestran que, si se acerca demasiado al agujero, se convertirá en un anillo aplanado, en un disco de acreción. Conforme el gas del disco vaya cayendo en espiral hacia su fin, el calor de la fricción irá elevando su temperatura hasta millones de grados. Y antes de que la materia desaparezca para siempre en el agujero podrían también emerger del disco haces de partículas.

Al menos eso dice la teoría. Pero nadie ha visto nunca un agujero negro. Cierto es que la teoría de la relatividad predice su existencia, aceptada por la inmensa mayoría de los astrofísicos; mas la situación cambia cuando se trata de someter a prueba ese postulado. Dado su carácter invisible,

1. UN CUASAR brilla gracias al disco de gas que se arremolina frenéticamente alrededor de un agujero negro que contiene mil millones de veces la masa solar. Los satélites astronómicos sensibles a los rayos X y a los rayos gamma están levantando el velo de misterio de estos derviches celestes.

Exploración del espectro electromagnético

LAS ONDAS DE RADIO y **LAS MICROONDAS** se han venido estudiando, desde los años treinta, con telescopios instalados en el suelo. Las mejores observaciones de radio proceden de redes de antenas o de discos gigantescos.

LOS RAYOS INFRARROJOS de la mayor parte de las longitudes de onda (energías) son absorbidos antes de llegar al suelo. La astronomía de infrarrojos empezó en 1983, cuando la NASA lanzó el *Satélite Astronómico de Infrarrojos*.

LA LUZ VISIBLE cubre tan sólo una minúscula porción del espectro electromagnético. Las observaciones a otras energías han permitido completar muchos detalles que quedaban por conocer acerca del cosmos.

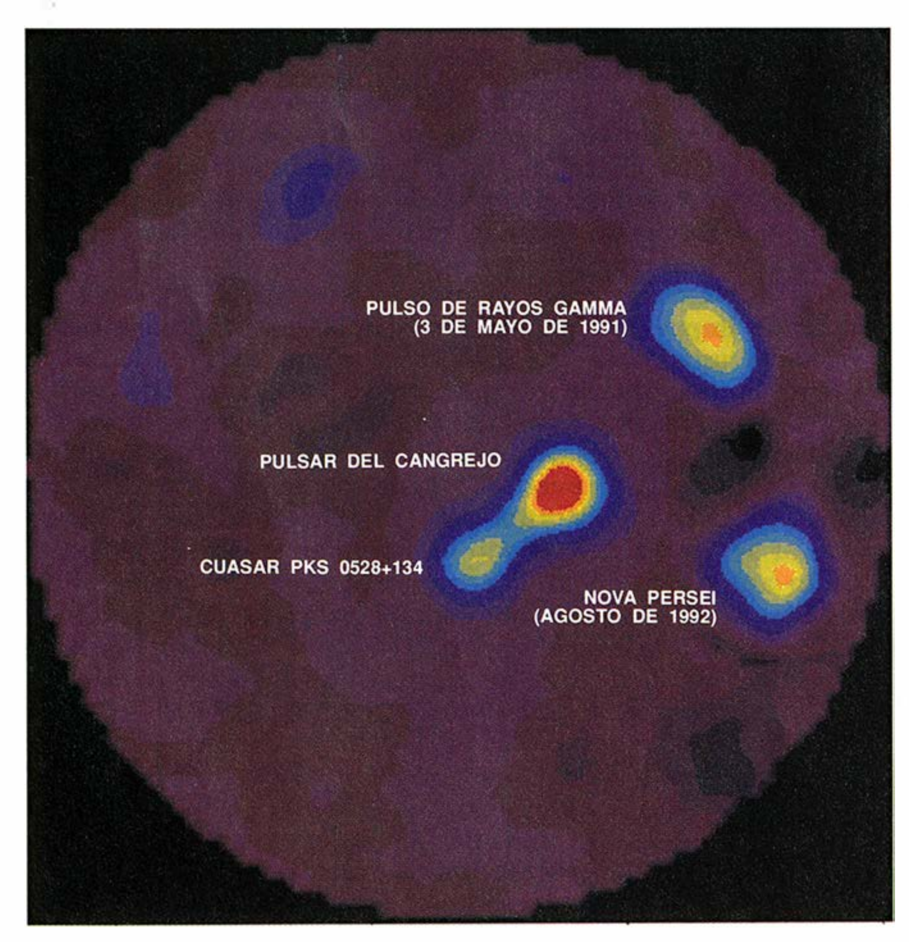
RADIO · INFRARROJO · LUZ VISIBLE · ULTRAVIOLETA

ENERGIA (ELECTRONVOLT) 10^{-6} 10^{-4} 10^{-2} 10^{0} 10^{2}

sólo pueden buscarse los agujeros observando qué ocurre en sus posibles alrededores. Aquí es donde las observaciones de rayos X y de rayos gamma se hacen indispensables. Estos rayos transportan tanta energía, que deben de originarse en las regiones más tormentosas del espacio, en la vecindad de los agujeros.

Las novas de rayos X son una auténica mina donde obtener tal tipo de información. Esos objetos inquietos del firmamento de rayos X son capaces de multiplicar un millón de veces su brillo, para acabar desvanecidos escasos meses después en la obscuridad más cerrada. Recuerdan, en su comportamiento, a las novas normales, en que una estrella muere engullida poco a poco por su compañera, remanente estelar colapsado que recibe el nombre de enana blanca; el gas se acumula en la superficie de la enana hasta que alcanza un punto crítico, y entonces explota como una bomba de hidrógeno gigante.

Ahora bien, debido a ese brillo energéticamente muy superior de las novas de rayos X sobre el de las novas normales, el objeto colapsado es probablemente más denso que una enana blanca incluso. Podría ser un agujero negro. "No hay nada", dice Jeffrey E. McClintock, del Centro Astrofísico Smithsoniano de Harvard, "que nos dé pruebas más firmes de la existencia de los agujeros negros que las novas de rayos X".



2. LA NATURALEZA ERRATICA del cielo de rayos gamma es recogida en esta imagen compuesta construida por el COMPTEL, uno de los instrumentos a bordo del *GRO*. El púlsar del Cangrejo es la fuente continua de rayos gamma que despide mayor brillo; se ilumina 30 veces por segundo. En agosto del año pasado, Nova Persei 1992 multiplicó su luminosidad 100.000 veces, pero ha comenzado ya a desvanecerse en total obscuridad. Los cuásares varían en el transcurso de días. El pulso de rayos gamma brilla con excepcional resplandor y se desvanece a los 10 segundos.

La caza de un agujero negro

McClintock atribuye al carácter efímero de las novas de rayos X el motivo de su interés. Ante el fulgor producido durante la explosión palidecen los componentes de la nova, pero una vez que se desvanece la fuente de rayos X podemos observar sin dificultad la estrella normal acompañante, medir su movimiento y, a partir de eso, deducir la masa del extraño cuerpo alrededor del cual orbita.

Los datos recogidos a lo largo de los dos últimos años van ganando en interés. El año pasado, por ejemplo, J. Casares, del Instituto Astrofísico de las Canarias, y sus colaboradores analizaron V404 Cygni, una nova de rayos X (localizada a 7000 años luz de la Tierra) cuya erupción ocurrió en 1989. Anunciaron que la estrella invisible debe tener, como mínimo, 6,3 veces la masa del sol, lo que hace que V404 Cygni sea, en palabras de sus descubridores, "el caso por ahora más convincente de existencia de un agujero negro".

El comportamiento violentamente irregular de las novas de rayos X nos permite vislumbrar qué pasa cuando hay un agujero negro en la proximidad de una estrella normal. Según cierta explicación de su mecanismo

LOS RAYOS ULTRAVIOLETAS y las radiaciones más energéticas no pueden penetrar en la atmósfera. El satélite *Explorador Internacional de Ultravioletas,* lanzado en 1978, ha rastreado el firmamento en esas longitudes de onda.

LOS RAYOS X procedentes de allende el sistema solar fueron descubiertos en 1962 utilizando sondas en cohetes. El *Satélite Roentgen*, que empezó a operar en 1990, ofrece imágenes de rayos X de una nitidez y sensibilidad sin precedentes.

LOS RAYOS GAMMA procedentes de fuentes cósmicas fueron detectados por satélite en 1967. El *Observatorio Compton de Rayos Gamma* está llevando a cabo el primer mapa detallado del cielo de rayos gamma.

RAYOS X | RAYOS GAMMA

10^4 10^6 10^8 10^{10} 10^{12}

de encendido y apagado, el agujero negro se queda sin combustible, salvo durante episodios esporádicos en que la estrella compañera se hincha y sus capas exteriores se precipitan en el agujero. Para otros, el gas de la estrella normal se acumula en un disco circundante al agujero negro hasta que el disco alcanza un estado crítico; de repente, comienza a precipitarse en espiral, fenómeno que provoca una llamarada de radiación.

La investigación teórica de Wan Chen, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA, juntamente con Gehrels y con Mario Livio, del Instituto Científico del Telescopio Espacial, de Baltimore, apoya la última explicación. El grupo de Chen señala que las novas de rayos X suelen sufrir uno o dos aumentos de brillo secundarios un par de meses después de la explosión inicial; el *GRO* ha registrado este comportamiento en Nova Persei 1992, una nova de rayos X de brillo insólito que hizo erupción el año pasado. Gehrels y sus colaboradores sospechan que la oleada inicial de rayos X está desencadenada por una inestabilidad en el disco de acreción. La radiación procedente de los alrededores inmediatos al agujero negro libera entonces material de la superficie de la estrella acompañante; este material termina por caer en el agujero, creando las subsiguientes llamaradas de rayos X.

Gracias al progreso en cantidad y calidad de las observaciones de rayos X, se ha descubierto un rasgo un tanto desconcertante en el parpadeo de las novas de rayos X. El grupo dirigido por William S. Paciesas, de la Universidad de Alabama en Huntsville, observó la Nova Persei 1992 gracias al *GRO*; encontraron que su brillo variaba de una manera repetitiva, aunque no del todo regular, es decir, en oscilaciones cuasiperiódicas. El satélite japonés *Ginga* registró fluctuaciones similares en otras novas de rayos X. Durante el pasado año, se han detectado también cambios cuasiperiódicos en Cygnus X-1, un sistema estelar binario del que hace tiempo se sospecha que aloja un agujero negro.

"De repente están apareciendo oscilaciones cuasiperiódicas por todas partes", comenta Jay P. Norris, del Goddard. Hasta hace poco, la mayoría de los expertos creía que las oscilaciones sólo podían ocurrir alrededor de objetos que, como las enanas blancas y las estrellas de neutrones, presentan superficies sólidas en rotación. Pero los agujeros negros carecen de superficies en el sentido usual del término. Un proceso de eliminación lleva a la conclusión de que las oscilaciones deben originarse en el disco de acreción; ahora bien, "no hay ni una teoría sólida que indique de dónde proceden exactamente las oscilaciones de agujero negro", declara Norris.

Las registradas hasta ahora tienen períodos comprendidos entre los 10 y los 100 segundos, demasiado lentas para que las cause la rotación de las partes interiores del disco. Eric Gotthelf, de la Universidad de Columbia, sugiere que las oscilaciones pueden ser el resultado de líneas de campo magnético que se rompen y se conectan de nuevo en el disco que gira rápidamente.

La búsqueda de agujeros negros en binarias de rayos X no ha despertado sólo el interés; también ha traído algunas sorpresas, aunque anda lejos de despertar las pasiones que levanta la idea de que en el centro de la Vía Láctea reside un agujero negro monstruoso, cuya masa sería un millón de veces la solar. Parecería que localizar una máquina devoradora de tan gigantescas proporciones en medio de nuestra propia galaxia tendría que ser una cosa sencilla, pero la verdad es que los indicios se prestan a interpretaciones contrapuestas. El propio Martin J. Rees, de la Universidad de Cambridge, uno de los proponentes originales de la idea, admite que "las pruebas no son apodícticas", pero, apostilla, "tampoco las hay *en su contra*".

Rees y otros presentan un argumento general en favor de la existencia de un agujero negro en el corazón de la galaxia. Muchas galaxias, la mayoría quizás, atraviesan por una fase inicial turbulenta, durante la cual poseen regiones activas y brillantes en sus centros. Joachim Trümper, del Instituto Max Planck de Física Extraterrestre en Garching, calcula que el *ROSAT* ha observado 25.000 de estos núcleos galácticos activos. La mayoría de los teóricos opina que estos objetos están alimentados por agujeros negros de mucha mayor masa que los asociados con las binarias de rayos X. Semejantes gigantes colapsados deben hallarse, pues, dormidos en galaxias más próximas y más viejas. Si esta teoría es correcta, entonces es probable que la Vía Láctea contenga también un agujero negro.

Hay indicios de que es así. Los astrónomos han identificado una intensa fuente de radio, Sagittarius A*, situada en el centro exacto de la galaxia o muy cerca del mismo, en medio de una región de gas perturbado, en rápido movimiento. Mas, a diferencia de las novas de rayos X, Sagittarius A* resultó ser un blanco difícil de localizar con telescopios de rayos X y de rayos gamma. La escasez de radiación de alta energía procedente de Sagittarius A* no sorprendió a Rees: "quizá se pase la mayor parte del tiempo sin apenas inmutarse", dice; en otras palabras, la tranquilidad del agujero puede obedecer a que esté cayendo muy poco gas en su seno.

Por último, en 1991, el satélite franco-soviético *GRANAT* consiguió detectar una débil emisión de rayos X procedente de Sagittarius A*. Y en la reunión de la Sociedad Astronómica Americana de enero de este año, un grupo dirigido por John R. Mattox, del Goddard, explicó que el telescopio EGRET, a bordo del

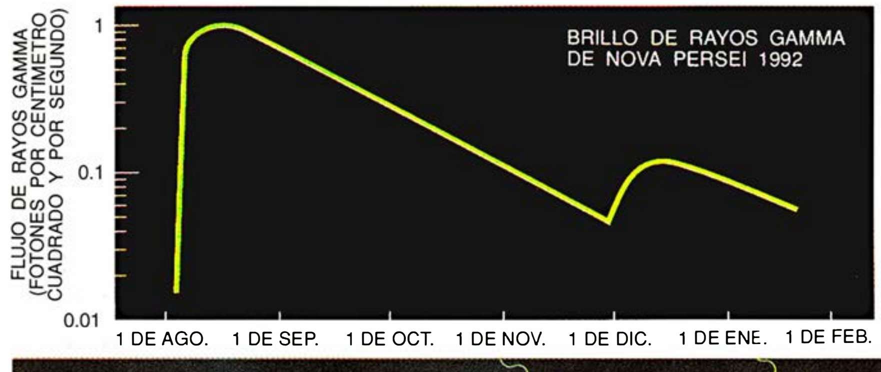
GRO, había detectado una débil fuente de rayos gamma en un entorno, de unos 50 años luz de diámetro, del centro dinámico de nuestra galaxia.

Fulvio Melia, de la Universidad de Arizona, ha construido un modelo coherente y cerrado en el que las emisiones inestables de radio, de rayos X y de infrarrojos de Sagittarius A* emergen de un disco de gas caliente que cae en espiral alrededor del agujero negro. Le ha calculado una masa unas 900.000 veces la solar, y un diámetro de unos 100 millones de kilómetros, más o menos el tamaño de la órbita de Mercurio alrededor del sol. Otros se muestran más escépticos; Robert Petre, de Goddard, declara que "el jurado aún está deliberando; hay demasiadas pruebas contrapuestas sobre el agujero negro del centro de la galaxia".

Esta confusión se debe, en parte, al hecho de que no sólo una, sino varias fuentes de rayos X y rayos gamma están cerca del centro de nuestra galaxia. Una de las que más controversia han levantado tiene el olvidable nombre de 1E 1740.7-2942. Hace tres años, el equipo de Rashid Sunyaev, del Instituto de Investigaciones Cósmicas de Moscú, comunicaba que el *GRANAT* había observado un pulso de rayos gamma breve y brillantísimo procedente de 1E 1740.7-2942. La mayor parte de la radiación tenía una energía cercana a 511.000 electronvolt, la cantidad liberada cuando un electrón se encuentra, y se aniquila, con su compañero de antimateria, el positrón. (A modo de comparación, la luz visible tiene una energía de unos 2 electronvolt.) Por esta razón, Marvin Leventhal, actualmente en el Goddard, apodó a la fuente el "Gran Aniquilador".

Leventhal esboza el modo de operación del Gran Aniquilador. Se podría tratar de una estrella masiva normal y un agujero negro de masa estelar que giran la una alrededor del otro en una órbita muy cerrada. El gas que se precipita en el agujero se vuelve tan caliente que emite rayos gamma. Debido a la exigua extensión de la región de radiación que ciñe al agujero, muchos rayos colisionan entre sí creando pares de electrones y positrones. Chorros de electrones y positrones son lanzados fuera del sistema; por último, los positrones se aniquilan con los electrones de una densa nube de gas cercana, creándose así los rayos gamma de 511.000 electronvolt.

Lo mismo que otros candidatos a agujeros negros, el Gran Aniquilador es un objeto harto caprichoso. William Purcell, Jr., de la Universidad del Noroeste, cuenta que el instrumento OSSE del *GRO* "no ve indicio alguno" de que el Gran Aniquilador aniquile nada. "Sería mucho más interesante si hubiéramos visto

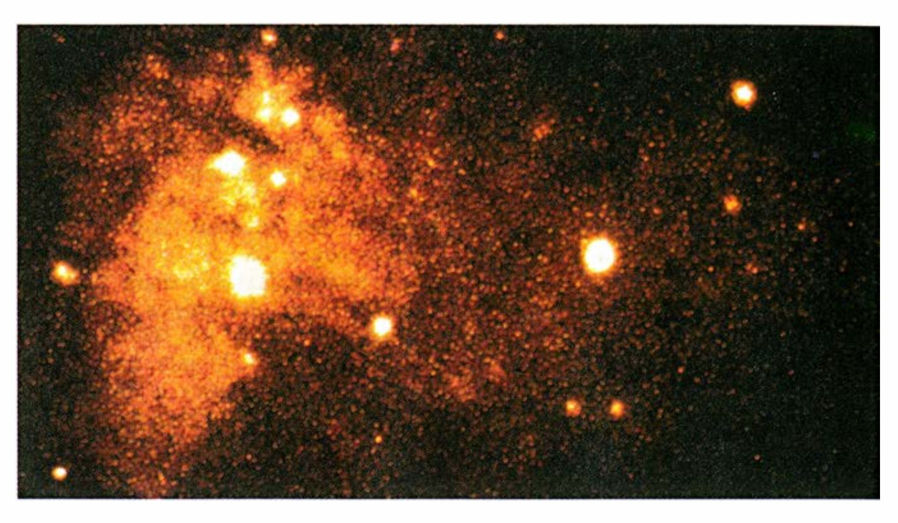


3. LAS NOVAS DE RAYOS X entran en erupción cuando material procedente de una estrella normal fluye hacia su compañera colapsada, posiblemente un agujero negro. El gas que procede en espiral alrededor del agujero negro se va calentando y emite torrentes de rayos X antes de ser engullido (*abajo*). Las erupciones de novas son bruscas, como podemos apreciar en esta curva de luminosidad de Nova Persei 1992 (*arriba*). El brillo secundario de la nova podría obedecer a inestabilidades en la estrella normal provocadas por radiación procedente de la vecindad del agujero negro.

la línea de 511.000 electronvolt", acepta, "pero digo lo que veo".

Por otro lado, un radiomapa realizado por el grupo de I. Felix Mirabel, del Centro de Investigación Nuclear de Saclay, reafirma el aspecto un tanto raro y espectacular del Gran Aniquilador. De una fuente compacta que coincide con la localización de las emisiones de rayos X y de rayos gamma emergen dos chorros opuestos de emisión de radio. Para Mirabel, y también para Leventhal, los chorros de radio señalan el movimiento de los positrones de alta velocidad antes de que perezcan en las nubes de gas circundantes.

Pese a que tales estructuras en chorro no abundan en la Vía Láctea, se trata de objetos familiares para los astrónomos que estudian las mayores fuentes cósmicas de energía, los cuásares, y sus asimilados, los núcleos galácticos activos. En muchos casos, los chorros se prolongan centenares de miles de años luz desde la fuente brillante y compacta que hay en los centros de esas galaxias. Los núcleos galácticos activos se asemejan también al Gran Aniquilador por su combinación aparentemente paradójica de rápida variación y titubeante luminosidad.



4. VISTA DE RAYOS X captada por el *Satélite Roentgen* (*ROSAT*). Nos muestra detalles muy finos de la Gran Nube de Magallanes. La mancha brillante de la mitad izquierda representa el intenso fulgor de rayos X procedente de LMC X-1, un sistema estelar binario que aloja, se dice, un agujero negro. Otras fuentes que se distinguen son estrellas y nubes de gas caliente. La imagen abarca unas cuatro veces el diámetro de la luna llena.

Explicar los cuásares

Los cuásares multiplican por mil el brillo de la Vía Láctea entera, aunque su intensidad en la luz visible puede variar en un 50 por ciento en el transcurso de un solo día. La última ronda de observaciones de alta energía, principalmente con el *GRO*, hace hincapié en el comportamiento extremista que evidencian algunos cuásares. Los nuevos corroboran, de manera impresionante, los principales modelos teóricos.

Estos modelos defienden que los cuásares más luminosos contienen agujeros que engloban mil millones de masas solares en una región que cabría en la órbita de Plutón alrededor del sol. Como en las binarias de rayos X, habría nubes de gas girando en círculos que se calentarían y radiarían con violencia justo antes de ser absorbidas por el agujero negro central. En ciertos casos, el disco de acreción lanzaría chorros de partículas cargadas de decenas de miles de años luz de longitud. El ángulo con el que ven el disco los astrónomos terrestres determina la apariencia del objeto y, por tanto, su rango en la clasificación. Los cuásares y sus primos hermanos, los objetos BL Lac, son los núcleos galácticos activos más luminosos; sus parientes más tranquilos reciben el nombre de galaxias de Seyfert.

Las observaciones a energías de los rayos X sirven como prueba, aunque sea circunstancial, de que los núcleos galácticos activos constituyen discos de acreción alrededor de agujeros negros de masa extraordinaria. Desde hace algunos años, se sabe que el brillo en rayos X de los núcleos varía de forma brusca, en horas o incluso en minutos. "Muchos están intrigados por la variabilidad de los rayos X", explica Andrew Lawrence, del Colegio londinense Queen Mary and Westfield, "porque la velocidad con que ocurre te indica que debes estar mirando al propio centro", es decir, a la vecindad inmediata del agujero negro. Sólo en las regiones más internas que rodean al agujero las distancias serían lo suficientemente cortas y los movimientos lo suficientemente rápidos para que los cambios pudieran ocurrir en escalas de tiempo tan breves.

Se había señalado con anterioridad que las variaciones de rayos X acontecían de manera aleatoria. Pero, cuando Lawrence y su alumno de doctorado Iossif Papadakis analizaron de nuevo las observaciones archivadas de rayos X de la galaxia de Seyfert NGC 5548, encontraron algo inesperado: una oscilación cuasiperiódica de unos ocho minutos. Al someter a comprobación las observaciones procedentes del *Ginga*, Lawrence y Papadakis vieron allí también la misma estructura temporal. Reforzó su confianza el que se hubiese acabado de detectar oscilaciones similares en sistemas de estrellas binarias donde se supone la existencia de agujeros negros. Lawrence sospecha que "el mismo mecanismo explica ambos tipos de objetos".

La periodicidad de NGC 5548 podría denunciar una masa de material caliente que orbita en torno a un disco de acreción inaccesible a la vista o de una inestabilidad oscilante en el propio disco. Si alguna de estas interpretaciones fuese correcta, cabría inferir la masa aproximada del agujero negro a partir del período de la variación. Lawrence cifra la masa entre 100.000 y un millón de veces la del sol, la décima o centésima parte de la que otros calculan a partir de la variación óptica de NGC 5548.

Los teóricos van aceptando que las oscilaciones cuasiperiódicas ocurrirán probablemente allá donde haya discos de acreción, pero hasta el momento sólo una galaxia de excepcional actividad muestra cambios regulares con la precisión de un reloj. En 1985 el *EXOSAT*, un satélite de rayos X, encontró que la fase flameante de otra galaxia de Seyfert, NGC 6814, parecía repetirse cada 3,3 horas. Chris Done, de la Universidad de Leicester, analizó datos recientes del *Ginga* y obtuvo un período más preciso de 12.130 segundos. Demostró también que el período permanecía "muy estable", lo que sugiere que no se origina en un disco de acreción; en éste, las condiciones cambian, probablemente, sin solución de continuidad.

Done considera que la causa más plausible de la variación regular es una estrella atrapada en una órbita baja alrededor del agujero. Una tal interpretación exige que los intensos rayos X emitidos por NGC 6814

procedan de un objeto, no de una gavilla de fuentes menores. Razonamiento que abona la presencia de un agujero negro muy pesado; el período de la variación da incluso una idea de la masa del agujero.

La estrella no ha sido devorada todavía por el agujero y, por tanto, debe estar orbitando a cierta distancia que la mantenga a salvo. Si la estrella girase a unos 80 millones de kilómetros del agujero, unas 50 veces el radio del propio agujero, el agujero tendría un millón de veces la masa del sol. Done explica que el objeto central debe contener menos de 100 millones de masas solares para que la estrella no sea engullida, y más de 100.000 masas solares para que se produzca la luminosidad observada de rayos X de NGC 6814. Este intervalo encaja en la gama de valores esperables de acuerdo con los modelos de la generación del brillo de los núcleos galácticos activos.

Fotones del infierno

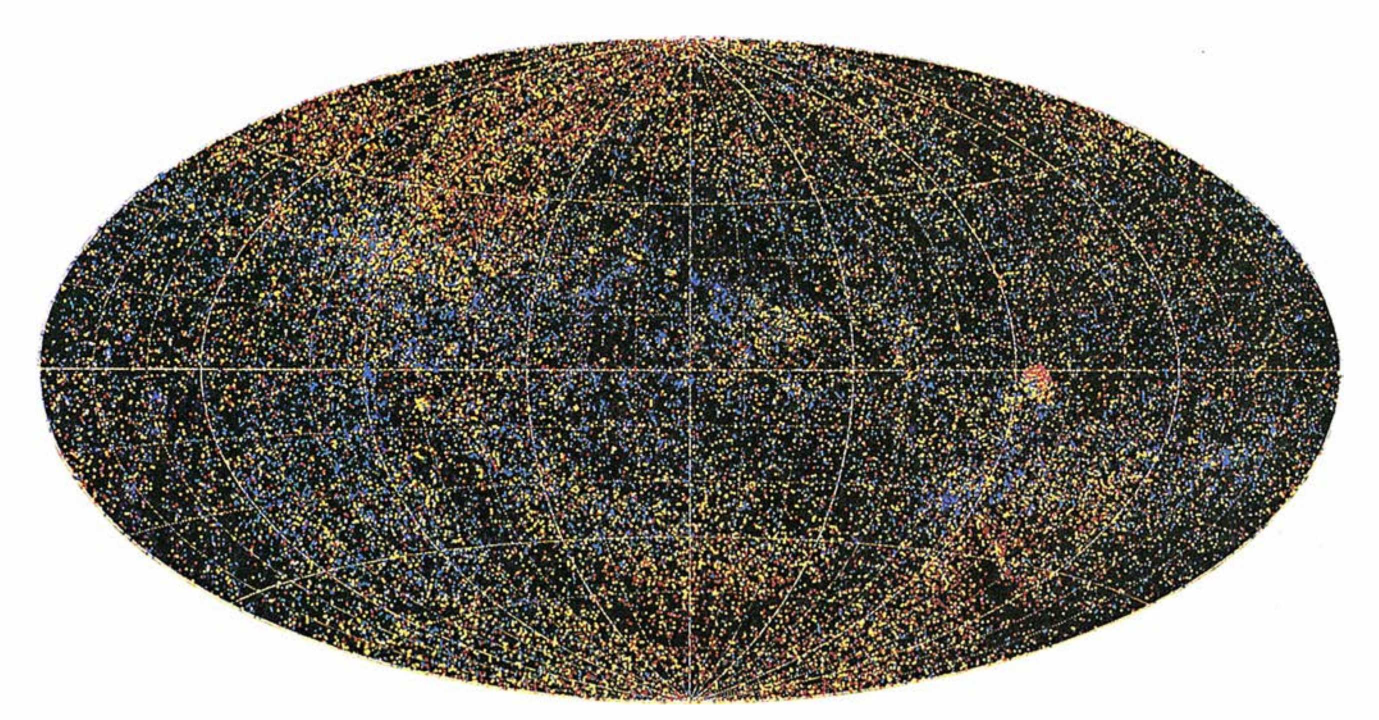
El observatorio *GRO* está sirviendo para contrastar algunos detalles de estos modelos gracias al cuadro que nos ofrece de los núcleos galácticos activos a energías de rayos gamma muy altas. Hasta ahora, explica Charles D. Dermer, del Laboratorio de Investigaciones Navales en Washington, los resultados del *GRO* "casan bastante bien con el modelo imperante". No se ve que las galaxias activas que no producen emisiones de radio lancen chorros; por consiguiente, toda su radiación debe proceder del material que rodea al agujero negro. La emisión proveniente de estas galaxias activas "sin señales de radio" desaparece a energías por encima de los 100.000 electronvolt. El espectro de alta energía de estos objetos se parece a lo que cabría esperar de un disco de gas caliente que girase en torno a un agujero negro de masa extraordinaria.

Las galaxias activas que tienen chorros de emisiones de radio deberían ser capaces de producir efusiones de rayos gamma a energías mucho más altas. Antes del lanzamiento del *GRO* en 1991, sólo se había observado una galaxia activa, el cuásar 3C 273, que emitiese rayos gamma de una energía superior a 100 millones de electronvolt, y así nadie podía sacar ninguna conclusión general.

La situación ha cambiado con los exhaustivos barridos del cielo de rayos gamma operados por el *GRO*: se han observado 23 de tales galaxias, número que crece por semanas. Todos esos objetos son potentes fuentes de radio y muestran, en su inmensa mayoría, un "espectro vivo" ("blazar-type spectrum"), que a las energías más altas es manifiestamente distinto del correspondiente a la radiación emitida por un gas caliente. "Diríase, concluye Dermer, que estamos mirando casi en línea recta al chorro de estas galaxias."

La existencia de un chorro orientado hacia la Tierra ayudaría a explicar muchas de las características del singular cuásar 3C 279. Aunque está situado a unos seis mil millones de años luz de distancia, a mitad de camino del límite visible del universo, el 3C 279 aparece claramente en los detectores del *GRO*. Estas observaciones acreditan que el 3C 279 es la fuente de rayos gamma más brillante del universo: emite 10 veces más energía en rayos gamma que en todas las otras partes del espectro. El motor debe ser pequeño. El grupo de Robert C. Hartman, del Goddard, observó el año pasado, mediante el telescopio EGRET instalado a bordo del *GRO*, que el brillo de rayos gamma del 3C 279 se duplicaba y, después, disminuía en un factor cuatro en un período de dos semanas.

Un haz de partículas que viajen a velocidad cercana a la de la luz explica en parte, al menos, las propiedades de 3C 279. Si la Tierra se encuentra en la línea de visión de un haz focalizado, entonces el cuásar no necesita radiar tan intensamente



5. EL MAPA DEL CIELO producido por el *ROSAT* nos muestra unas 50.000 fuentes de rayos X. De más de la mitad de ellas se piensa que son núcleos galácticos activos, galaxias que tienen unas regiones centrales anómalamente brillantes y dinámicas. Otras muchas fuentes son estrellas normales. Las galaxias activas están, en promedio, un millón de veces más alejadas que las estrellas, lo que da a entender la intensísima luminosidad de estas galaxias. Los colores denotan el flujo relativo de rayos X de alta energía ("duros") y de baja energía ("blandos") de cada objeto. El rojo indica las fuentes más blandas; el amarillo, las intermedias y, el azul, las más duras.

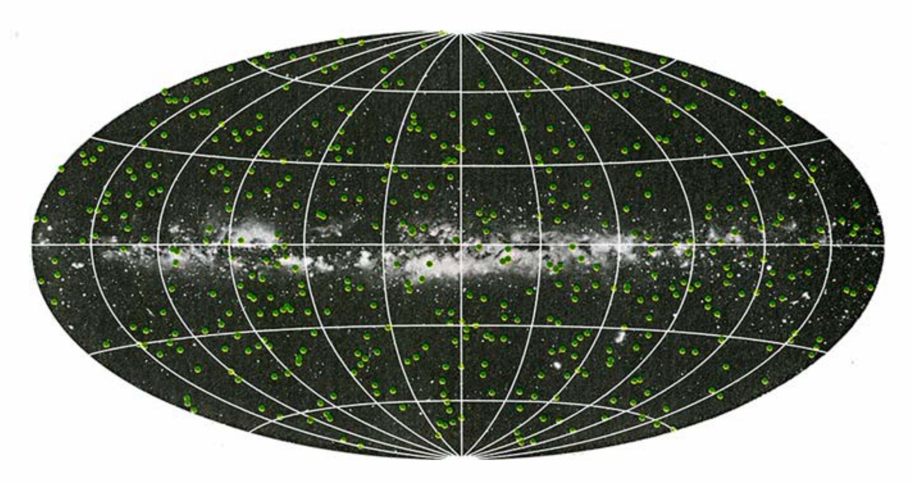
en otras direcciones y, por tanto, su luminosidad total puede ser algo más modesta que lo que cabría suponer. Las partículas aceleradas a velocidades próximas a la de la luz en el haz podrían transportar suficiente energía como para generar los rayos gamma de alta energía.

Era conocida la naturaleza "superlumínica" del cuásar 3C 279; se sabía ya que algunas de sus partes parecen, en imágenes de radio, moverse más deprisa que la velocidad de la luz. Se piensa que la superluminosidad es una ilusión causada por efectos relativistas propios de un haz orientado que viaja a casi la velocidad de la luz; esta interpretación es coherente con las demás observaciones.

Las partículas de los chorros se mueven con tanta violencia que dan lugar a rayos gamma demasiado energéticos, incluso para que los vea el *GRO*. En agosto del año pasado, el grupo encabezado por Trevor C. Weekes, del Observatorio Whipple en Amado, descubrió los rayos gamma más vigorosos vistos hasta ahora procedentes de una galaxia activa. Encontraron que Markarian 421, un objeto BL Lac próximo (está sólo a unos 400 millones de años luz, bastante cerca para un objeto de este tipo), emite rayos gamma que tienen billones de electronvolt de energía.

Estos rayos son tan energéticos que se pueden observar desde la superficie de la Tierra. Cuando colisionan con átomos de la atmósfera, los rayos crean una rociada de partículas subatómicas secundarias, que a su vez dan lugar a un destello visible al desacelerarse. Los rayos gamma procedentes de Markarian 421, que algunos llaman "fotones del infierno", indican que las partículas del chorro deben salir disparadas con al menos tanta energía como la de los rayos gamma que acabarán por emitir. El *ROSAT* demostró recientemente que Markarian 421 era otra fuente de rayos X muy variable.

El hallazgo de que muchos cuásares y objetos BL Lac brillan intensa e inestablemente a altas energías refuerza aún más el argumento de que estos objetos deben encontrarse alrededor de agujeros negros de masa extraordinaria. Una vieja teoría opuesta mantiene que las galaxias activas radian como consecuencia de extensas zonas de formación de estrellas y de explosiones de supernovas. Pero como indica Andrew Robinson, de la Universidad de Cambridge, un modelo tal no puede dar cuenta fácilmente de la energía o de la rápida variabilidad de la radiación procedente de muchos núcleos galácticos activos.



6. LOS PULSOS DE RAYOS GAMMA (*puntos verdes*) aparecen en cualquier sitio durante un tiempo que va desde una fracción de segundo a un par de minutos; no se ha visto nunca la repetición de un pulso. Muchos astrónomos pensaban que los pulsos se originaban en nuestra propia galaxia a partir de estrellas de neutrones, de manera que deberían aparecer alineados en la banda de la Vía Láctea (que se ve en esta fotografía de luz visible). El *GRO* ha mostrado, por contra, que proceden de direcciones aleatorias.

Explicar lo inexplicable

Algunos astrofísicos recurren también a los agujeros negros para dar razón de los pulsos de rayos gamma, quizás el fenómeno más enigmático y variable que se conoce. En un intervalo comprendido entre una fracción de segundo y un par de minutos, resplandecen con una intensidad que domina sobre cualquier otra fuente de rayos gamma del firmamento, incluido a menudo el propio sol. No hay dos pulsos que brillen igual, ni arranquen de la misma dirección. Además, los pulsos se intensifican y atenúan deprisa incluso para lo que es normal en la astrofísica de altas energías. Las variaciones más breves ocurren en mucho menos de una milésima de segundo, lo que indica que el pulso se origina en una región de unas decenas de kilómetros de diámetro. Nadie ha observado nunca los objetos de los que emergen los pulsos.

Mediados los años ochenta, los astrónomos llegaron a un acuerdo general acerca del origen de estas extrañas erupciones de rayos gamma. De acuerdo con la teoría aceptada, los pulsos se producen a partir de algún tipo de disrupción en una estrella de neutrones o en su vecindad. (La estrella de neutrones es un remanente ultradenso dejado por la explosión de una supernova.) La gravedad de una estrella de neutrones es tal que una masa solar vendría a comprimirse en una esfera de 20 kilómetros de diámetro. Debido a la abrumadora gravedad, incluso la más leve disrupción, un fenómeno sísmico o el impacto de un pequeño asteroide, puede liberar una tremenda cantidad de energía, lo que explicaría las fugaces llamaradas de radiación gamma.

Esperábase que las observaciones del *GRO* confirmaran la teoría vigente. El *GRO* transporta el BATSE, un experimento de pulsos y fuentes transitorias, que barre todo el cielo en busca de pulsos repentinos de rayos gamma. Si los pulsos estuviesen asociados a estrellas de neutrones, los más tenues deberían aparecer en el plano de la Vía Láctea, a la manera en que aparecen en el mismo las estrellas más débiles del cielo nocturno.

Para sorpresa de todos, el BATSE mostró que los pulsos débiles se repartían al azar por el firmamento, igual que los más brillantes. Para enredar más el rompecabezas, hay un déficit neto de pulsos débiles, lo que indica que el BATSE está observando el extremo de una población esférica y limitada. Y, a diferencia de otros instrumentos anteriores, el BATSE no detecta el tipo de espectro de rayos gamma que, según lo esperado, las estrellas de neutrones podrían producir.

De la noche a la mañana, el modelo de la estrella de neutrones entró en crisis. Hubo que presentar ideas nuevas. Pero su derrumbe no les sorprendió a todos. "Sólo era, de principio a fin, mera lucubración", dice Bohdan Paczyński, de la Universidad de Princeton.

Pues entonces, ¿qué es lo que está alrededor de la Tierra, más o menos igual se mire por donde se mire, y



7. BOHDAN PACZYNSKI, de la Universidad de Princeton, ha luchado durante muchos años por resolver el misterio de los pulsos de rayos gamma. No abandonó en los ochenta su escepticismo ante las teorías imperantes a propósito de los pulsos y, por tanto, no se sorprendió cuando el *GRO* demostró su falsedad. Para él, los pulsos podrían surgir de colisiones entre estrellas de neutrones en galaxias remotas.

posee, sin embargo, tamaño finito? La respuesta salta a la vista: el propio universo; en tal caso, el "extremo" que se percibe en la población de pulsos de rayos gamma corresponde al límite visible del cosmos. Paczyński ha venido durante años incordiando a la academia con esta posibilidad, antes de que aparecieran los resultados del BATSE; su opinión promete convertirse en mayoritaria.

La cuestión que Paczyński y los que con él coinciden deben abordar es cómo un objeto del tamaño de una isla media, situado a millones, o incluso a miles de millones, de años luz, puede eclipsar el resto del firmamento de rayos gamma. Lo inmediato es apelar a un agujero negro. Según Paczyński, una estrella de neutrones colisiona con un agujero negro, o se unen dos estrellas de neutrones formando un agujero. La colisión inicial, y los escombros resultantes que caen en el hoyo, liberarían una breve e intensa ráfaga de radiación gamma. Un modelo así "satisface las condiciones observacionales básicas" relativas a los pulsos de rayos gamma, aunque se apresura a añadir que "no hay nada en los datos que nos muestre que andamos en lo cierto".

Bradley E. Schaefer, del Goddard, afirma que "puedo nombrar hasta ocho refutaciones bastante buenas" del modelo de Paczyński. Pero su crítica más acerada expone que, en la versión más sencilla del modelo, las estrellas de neutrones en colisión producirían un tipo de espectro de rayos gamma muy diferente del que muestran los pulsos. Por otro lado, Dermer señala que los pulsos de rayos gamma parecen "sorprendentemente similares a las emisiones de rayos gamma procedentes de cuásares". Apunta, pues, hacia un modelo de agujero negro también, pero muy distinto. En su escenario predilecto, los pulsos tienen lugar cuando un tranquilo agujero negro de gran masa, en el centro de una galaxia, engulle una estrella entera de un solo bocado brevísimo. Pero no faltan los problemas: Rees ha calculado que la llamarada resultante duraría unos cuantos años, no unos cuantos segundos.

Paczyński rechaza con razón que sea obligado acudir a los agujeros negros. Si los pulsos de rayos gamma no ocurren en los extremos alejados del universo, los teóricos podrían volver al modelo del pulso de la estrella de neutrones desarrollado antes de que entrara en funcionamiento el BATSE. La cuestión a explicar entonces es la del mecanismo en virtud del cual aparecen igual los pulsos en cualquier dirección. Para dar cuenta de tamaña distribución uniforme podemos suponer que la Vía Láctea está rodeada por un halo de estrellas de neutrones de más de 100.000 años luz de radio.

Pero, ¿cómo han ido a parar las estrellas de neutrones al halo, donde no se observan estrellas normales? Joseph Silk, de la Universidad de California en Berkeley, en colaboración con David Eichler, de la Universidad Ben Gurion en Israel, aducen que la Vía Láctea podría estar rodeada por multitud de enanas blancas, que serían reliquias de la más antigua población de estrellas, formadas antes de que nuestra galaxia se hubiera contraído hasta adquirir su actual estructura espiral plana. Pares de estas enanas blancas se fusionarían ocasionalmente, originando una estrella de neutrones. Cada estrella de neutrones recién nacida emitiría un pulso de rayos gamma cuando su interior se asentase.

La búsqueda de agrupaciones masivas de material no visto que rodeen la Vía Láctea (la famosa "materia oscura") establecerá en los próximos años si la nube de enanas blancas propuesta por Silk existe o no. De cualquier modo, la información procedente del BATSE no parece favorecer los modelos que sitúan los pulsos de rayos gamma en el halo de la Vía Láctea. Jerome James Brainerd, del centro de vuelo espacial Marshall, de la NASA, abandonó la confianza que les había depositado porque "hoy en día veo difícil que se pueda mantener en pie un modelo de halo galáctico".

La clamorosa falta de una explicación apropiada de los pulsos de rayos gamma ha llevado a algunos a hilvanar modelos un tanto sospechosos. R. Stephen White, de la Universidad de California en Riverside, busca el origen de los pulsos en colisiones de cometas. Su modelo requiere la existencia de una nube de cometas magnetizados que circunde al sol, hasta ahora desconocida.

"Lisa y llanamente, ignoramos qué sean esos pulsos", dice Gerald Fishman, del Marshall y principal científico del BATSE. Más de 100 modelos de pulsos de rayos gamma han aparecido en las revistas técnicas a lo largo de los dos últimos años.

Ciencia y empresa

Ataque por tres flancos

Contra la esclerosis múltiple

Hasta ahora la medicina ha ofrecido más frustración que consuelo a los 2,3 millones de personas que padecen esclerosis múltiple (EM) en todo el mundo. Una y otra vez se han descubierto nuevas maneras de curar ratas de laboratorio con encefalomielitis autoinmune experimental (EAE) —variedad múrida de la EM—, pero también una y otra vez se ha tropezado con obstáculos para trasladar estos tratamientos a los humanos. No es extraño, pues, que se acogieran con cauto optimismo tres recientes anuncios de resultados prometedores sobre la EM humana.

En marzo, en los Estados Unidos, un comité consultivo federal recomendó que la Administración de Alimentos y Medicamentos aprobase un nuevo fármaco que parece retrasar el avance de la EM. Con el nombre comercial de Betaserton, fue desarrollado por Chiron and Berlex Labs, subsidiaria de la alemana Schering A. G. Mientras tanto, otros dos grupos de investigación —uno en la facultad de medicina de la Universidad de Stanford, dirigido por Lawrence Steinman, que es además inmunólogo jefe de Neurocrine Biosciences, y el otro bajo la dirección de Howard L. Weiner y David A. Hafler, de la Facultad de Medicina de Harvard y respaldado por AutoImmune— notificaban resultados que también, esperaban, podrían conducir a nuevas terapias.

Se desconoce el agente causante de la esclerosis múltiple, pero hay indicaciones de orden estadístico. Alrededor del 60 % de los pacientes de EM comparten una clase de tejido genético llamada DR2; el 60 % son mujeres, y muchos pasaron su adolescencia en regiones donde la enfermedad parece ser más frecuente de lo normal. Se ha podido determinar que la EM es una enfermedad autoinmune, como la artritis y la diabetes dependiente de insulina. Cuando una de estas enfermedades se declara, una parte del sistema de defensas del organismo se vuelve contra las células normales.

En los pacientes de EM, el blanco inmediato de esta autodestrucción es la mielina, vaina protectora que aísla eléctricamente los nervios. El ataque contra la mielina está gobernado por las células *T* coadyuvantes. Estos linfocitos de la sangre son monomaníacos: cada uno posee receptores de células *T* (RCT) particulares que sólo le permiten unirse con una determinada secuencia proteínica y reaccionar contra ella; tal secuencia constituye su antígeno.

En condiciones normales, cuando una célula *T* coadyuvante tropieza con su antígeno da la señal de alarma, se reproduce desaforadamente y apela a las células *T* asesinas para que destruyan lo que considera un intruso. Pero hay veces en que las células *T* responden a uno de los componentes de la mielina, generalmente la proteína básica de la mielina (PBM) o proteína proteolipídica (PPL). Tales células están inactivadas en los seres humanos sanos, pero no en los afectados por la EM.

Los investigadores de Chiron hallaron que podían aliviarse las recidivas de los enfermos inyectándoles altas dosis de interferón beta. Esa hormona del sistema inmune, o linfocina, estimula las células *T* supresoras para que repriman los ataques inmunitarios. En un estudio clínico realizado sobre 372 pacientes, quienes recibieron altas dosis de interferón beta sufrieron un tercio menos de episodios agudos que los tratados con un placebo. Al cabo de dos años, la región del cerebro afectada por lesiones se había reducido en un 4,2 % tras la administración de interferón, mientras que aumentaba el 19,4 % en los medicados con un inocuo placebo.

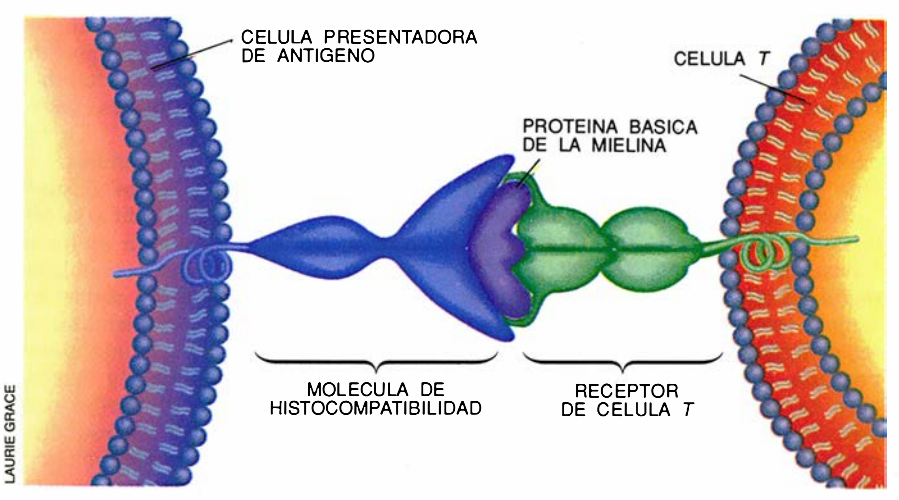
Sin embargo, el fármaco de Chiron no aclara el nudo del dilema: si la EM es producida por una familia de células *T* nocivas, genéticamente muy similares entre sí, o por una población diversificada de células *T*. El grupo de Steinman apoya la primera hipótesis. Tomaron muestras de tejido de las lesiones cerebrales de 16 pacientes de EM fallecidos, extrajeron de ellas bastantes células *T* y determinaron la secuencia de ADN de sus receptores. Comparando estas secuencias entre sí y con las bases de datos de ADN, observaron que los receptores de células *T* que incluían un componente llamado Vβ5,2 aparecían al menos una vez en nueve de los pacientes (y en siete de los ocho que eran DR2-positivos).

Según Steinman, es importante el que hubiera tantos pacientes con al menos algunas células *T* portadoras de Vβ5,2, pues se ha demostrado que las células *T* portadoras de ADN que especifica ese mismo componente atacan la mielina humana *in vitro* y la mielina múrida en algunas ratas con EAE. Steinman sostiene que la reacción de las células *T* con Vβ5,2 es "una de las respuestas fundamentales —si no *la respuesta* fundamental— en los cerebros afectados de EM".

Si lo anterior es cierto, el tratamiento debería ser bastante sencillo: identificado el culpable, sólo queda detenerlo. Neurocrine confía en ofrecer un fármaco con ese preciso cometido. Como explica su director de desarrollo empresarial, Kevin C. Gorman, "es un señuelo inmunológico; sabiendo exactamente qué receptor de célula *T* usa el sistema inmunitario para destruir la mielina y qué porción de la proteína básica de la mielina es reconocida por la célula *T*, podemos bloquear esa interacción con un péptido". Gorman espera que las pruebas de toxicidad en seres humanos se hayan iniciado a finales de 1994.

El número de aminoácidos de que consta el péptido por el que apuesta Neurocrine no llega a la docena, por lo que puede sintetizarlo en un laboratorio. Como sólo se unirá con unos pocos RCT determinados, el fármaco no deberá provocar los efectos secundarios que suelen acompañar a los interferones y otras sustancias que actúan sobre el sistema inmunitario. "Se trata de una inmunoterapia exquisitamente específica", alardea Gorman, mientras que para Weiner es "demasiado específica: una gran cantidad de pruebas teóricas indican que la respuesta inmunitaria afecta también a otras células, como las que reaccionan con la PPL o las que responden a la PBM con diferentes receptores de células *T*. El trabajo de Steinman es interesante, pero no creo que la respuesta inmunitaria en la EM sea tan restringida que se pueda tratar dirigiéndose a un solo subgrupo de células".

Hafler, que desde hace mucho defiende la hipótesis de la respuesta inmunitaria restringida en la EM, se muestra proclive a compartir ese enfoque. "Está claro que la cohorte de receptores de células *T* implicada varía de un individuo a otro". Refirién-



Las células T *portadoras de receptores para la proteína básica de la mielina (PBM) causan daños neurológicos en los pacientes de esclerosis múltiple (EM). Cuando se encuentran con PBM, crean clones de células* T *asesinas que atacan la mielina. Los investigadores hallaron un tipo específico de componente del receptor, llamado Vβ5,2 en algunas células* T *extraídas de lesiones cerebrales de EM*

dose a la secuenciación de los RTC hallados en la sangre de enfermos de EM, indica que "hemos clonado más de 100 células *T* que reaccionan ante la presencia de PBM, y sólo hemos encontrado en ellas un VB5,2. Afirmar que esta célula *T* por sí sola produce EM roza el ridículo".

Weiner y Hafler creen que tienen una idea mejor: administrar mielina a los pacientes de EM por vía oral. Los mamíferos tienden a tolerar mejor los antígenos ingeridos que los inyectados. Las ratas inyectadas con PBM quedaban pronto paralizadas por la EAE, pero mejoraban al administrarles después la proteína por vía oral. Aunque no se conozca bien el mecanismo de esta respuesta, la investigación de Weiner con animales sugiere que la proteína que se ingiere es procesada por los nódulos linfáticos en el intestino delgado, que generan entonces células *T* supresoras específicas para la PBM. Cuando llegan al cerebro y tropiezan con la PBM, las células supresoras tocan a retirada.

En un ensayo reciente realizado sobre treinta pacientes en la fase inicial de la EM, con períodos de mejoría y recidivas (la forma más común de la enfermedad), el equipo de Weiner administró diariamente a la mitad de los pacientes cápsulas de mielina bovina; la otra mitad recibía un placebo. Durante el año que duró el estudio, doce miembros del grupo de control sufrieron agravamientos de su EM, pero solamente a seis de los que tomaron mielina les ocurrió lo mismo. El estado de seis de los pacientes tratados mejoró apreciablemente a lo largo del año, lo que sólo sucedió con dos del grupo control. Asimismo, en la sangre de los pacientes tratados se observó una notable disminución del número de células *T* reactivas a la PBM, no apreciándose efectos secundarios ni infecciones oportunistas.

Hafler pone en guardia contra el excesivo entusiasmo: "se trata de un experimento clínico, no de una prueba propiamente dicha". Pero, añade con ardor, "la belleza e importancia de todo esto es que no hace falta saber cuál es el antígeno incitador. Tal vez hayamos encontrado una manera muy sencilla de desarmar la respuesta inmunitaria". Weiner señala que el tratamiento tiene ya, por su propia naturaleza, la forma ideal de un fármaco: una proteína natural administrada por vía oral.

AutoImmune espera que este resultado allanará el camino hacia la aprobación. Su jefe ejecutivo, Robert C. Bishop, declara que van a repetir la prueba de la mielina con 200 o 300 pacientes DR2-negativos, separando hombres y mujeres. El ensayo realizado con treinta pacientes demostró que el tratamiento oral ofrece un rendimiento en los hombres superior al que se alcanza con las mujeres, si bien Weiner subraya que los grupos eran demasiado pequeños para deducir conclusiones válidas.

Sin aguardar a la confirmación definitiva, Bishop espera publicar el próximo otoño los resultados de un ensayo en marcha con 60 pacientes que sufren de artritis reumatoide (utiliza colágeno de pollos). Pronto se pondrán a prueba tratamientos similares para la uveítis, que es una enfermedad oftálmica, y la diabetes dependiente de insulina. Y se esperan resultados todavía mejores en las pruebas relativas a la EM cuando la PBM humana recombinante, ya clonada, sea aprobada como fármaco.

Ondículas

Ponen a flote a Brahms en un mar de ruidos

"Soy el doctor Brahms, Johannes Brahms". La voz, áspera pero inteligible, sale de los altavoces del ordenador de Ronald R. Coifman. Al poco le sigue una insoportable cacofonía de silbidos, golpes, descargas estáticas y tonos distorsionados hasta los límites de la percepción. "Era de verdad Johannes Brahms tocando su Danza Húngara número uno", dice Coifman, profesor de matemáticas en la Universidad de Yale. Pero es de todo punto imposible escuchar su ejecución tal y como ha llegado hasta nosotros, grabada en 1889 en un cilindro de cera donado por Thomas Edison, que enseguida se perdería, y vuelta a grabar más tarde a partir de la emisión radiofónica, plagada de interferencias eléctricas, de un disco a 78 revoluciones por minuto realizado a partir del cilindro.

O, al menos, lo era hasta que Coifman logró recuperar lo que parecía perdido mediante una poderosa herramienta matemática de creciente importancia, denominada análisis de formas de onda adaptado, capaz de eliminar selectivamente de la grabación el ruido aleatorio al tiempo que preserva la música —tan estructurada— que hay debajo. Con un simple clic de ratón reproduce Coifman la versión expurgada. No todas las notas son correctas en tiempo y tono —el cilindro de cera original se había fundido ya un poco en la época en que se hizo la reproducción—, pero el ruido se ha suprimido casi por completo. El musicólogo Jonathan Berger, de Yale, y su alumno de posgrado Charles Nichols están analizando minuciosamente la grabación a fin de determinar si el sincopado que en ella se advierte es efecto de la distorsión o se debe a que Brahms tenía una manera peculiar, entrecortada, de tocar el piano.

El análisis de formas de onda adaptado anda en boga como versión de lujo del llamado análisis de ondículas, a su vez un refinamiento del análisis de Fourier desarrollado no hace mucho. Mientras que la técnica de Fourier utiliza un repertorio infinito de ondas sinusoidales y cosinusoidales para describir un sonido o

una imagen, este nuevo análisis toma como elemento constituyente un único impulso de forma particular: la ondícula. El análisis de formas de onda bebe en una biblioteca de formas de impulsos. "Es como una partitura musical", explica Coifman, "donde las notas fuesen coeficientes matemáticos y los instrumentos, formas de onda fundamentales. El objetivo es simplificar la notación".

Al paso que el análisis de formas de onda adaptado gana partidarios en la comunidad académica, las ondículas han penetrado ya en el mundo comercial. Coifman fundó Fast Mathematical Algorithms and Hardware, que colabora con Martin Marietta en mejorar la capacidad de los radares militares, de manera que distingan, digamos, entre un tanque y una ambulancia. M. Victor Wickerhauser, de la Universidad de Washington, elabora técnicas que hacen uso de las ondículas para la identificación de tumores en mamografías borrosas. Diversos grupos investigan otras aplicaciones médicas del análisis de ondículas, como son la observación del ritmo cardiaco fetal, el realzado ultrasónico de imágenes y el análisis de electrocardiogramas.

Pero la apoteosis de las ondículas, de haberla, vendrá con la compresión de datos. Howard L. Resnikoff, que fue profesor de matemáticas en Harvard, constituyó la firma Aware en Cambridge, Massachusetts, a fin de sacar provecho de la capacidad que tienen las ondículas de condensar eficazmente la información al representarla mediante patrones comunes. Aware ha incorporado sus técnicas de compresión por ondículas en una pastilla ("chip"), y su soporte lógico para la comprensión de sonidos e imágenes ha tenido una buena acogida. "Nuestra sistema de compresión de audio por ondículas se ofrecerá en todas las nuevas estaciones de trabajo de Silicon Graphics", dice feliz Resnikoff, y cita un reciente estudio oficial que concede al método de compresión de imágenes de Aware por su calidad puntuaciones superiores a las de sus competidores.

La compresión por ondículas parece especialmente adecuada para la transmisión de datos, pues no trocea la información transportada: las imágenes, por ejemplo, se descomponen en niveles de detalle, y no en filas y columnas. Así, a semejanza de un holograma, cada parte de la imagen contiene información sobre las demás partes. De este modo se hace más fiable la comunicación por canales ruidosos, indica Resnikoff. "Permite además una transmisión progresiva, que enfoque gradualmente la imagen a medida que va llegando información", añade Ingrid Daubechies, de los Laboratorios Bell de AT&T, en primera línea de la matemática de ondículas. "Eso viene bien para buscar algo en una biblioteca de imágenes".

Resnikoff cree que estas características pueden ser tan lucrativas como útiles. La Comisión Federal de Comunicaciones de EE.UU. acaba de asignar una porción del espectro a la radio digital, y Aware quiere estar en posición ventajosa cuando llegue la hora de ofrecer las técnicas de compresión necesarias para que las emisiones de radiodifusión digitales resulten factibles económicamente. Asimismo, Aware trata de captar la atención de las compañías telefónicas a las que el gobierno estadounidense ha concedido hace poco derechos de "tono videotelefónico". Aware cree que la compresión por ondículas tal vez sea precisamente lo único que a aquéllas les faltaba para poder mandar por un par de hilos de cobre toda la información que requiere la transmisión de películas a las casas. Puede, pues, que las ondículas se conviertan en una verdadera ola...

Extinguido

Fuera de combate un campeón de la lucha contra incendios

En el extremo de un fortín en herradura de la Base Wright-Patterson que la Fuerza Aérea de los EE.UU. tiene en Dayton, Ohio, varios motores de bombardero B-52 crean un viento de 500 nudos. Guiado este fuerte vendaval a través de conductos hasta una torre de tres pisos, rompe sobre el fuselaje de un avión F-15 con idéntico efecto que si estuviera en vuelo. En realidad, ese reactor de caza sirve como blanco de proyectiles incendiarios que disparan a su tanque de combustible unos cañones MiG de origen soviético. Lo que se espera es que el sistema de control de incendios del avión detecte la explosión y la sofoque en tres milisegundos, pero con mayor frecuencia hay que esquivar grandes bolas de fuego.

Después de todo, no muchos productos químicos pueden lograr tal hazaña en la lucha contra el fuego. Y todavía hay menos que sean inocuos, ligeros, altamente compresibles, no corrosivos, no conductores, químicamente estables y no dejen residuos que ensucien los motores. Así pues, cuando los ingenieros militares de los EE.UU. descubrieron en los años cuarenta que los compuestos halogenados denominados halones reunían todas estas cualidades, ya no buscaron otros.

Hoy ha vuelto a emprenderse la búsqueda. Por desgracia, los mismos ingredientes en los que radica la eficacia de los halones contra el fuego —el cloro y el bromo— catalizan también la destrucción del ozono estratosférico. El pasado noviembre, en la cuarta reunión de los miembros del Protocolo de Montreal en Copenhague, los ministros del medio ambiente de 87 países acordaron suspender la producción de halones a fines de 1993. DuPont, el mayor productor de estos compuestos, ha dejado ya de fabricarlos. A partir del próximo enero, nunca más podrán renovarse los 130 millones de kilogramos de halones que actualmente llenan unos 10 millones estimados de extintores, en aviones, tanques, submarinos y salas de ordenadores.

Ante el inminente fin del plazo, el Departamento de Defensa encargó al Laboratorio Wright de la Fuerza Aérea que encontrase y probase sustitutivos. Los militares, transcurrido ya uno de los tres años del programa de 16 millones de dólares (2000 millones de pesetas) de investigación conjunta con el Instituto Nacional de Normalización y Tecnología, no esperan disponer de prototipos de nuevos sistemas antes de 1998. Los dos laboratorios intentan seleccionar tres entre una docena de compuestos para probarlos exhaustivamente en el polígono de tiro de Wright. Pero no es probable que completen su trabajo antes de que entre en vigor la prohibición.

J. Michael Bennett, jefe del programa de sustitución de halones, no confía en encontrar un sustitutivo sencillo que pueda directamente cargarse en los extintores. Todavía peor, como la mayoría de esos doce compuestos son gases de invernadero particularmente peligrosos, que van a atrapar la radiación solar en la atmósfera superior durante milenios, ninguno de ellos puede ofrecer una solución de largo alcance.

Por este motivo, el grupo de Bennett investiga también métodos menos tradicionales. Han descubierto así que el bicarbonato sódico, finamente triturado y mezclado con un desecante, apaga rápidamente y sin riesgo algunos incendios en motores. Y la Fuerza Aérea pretende obtener contratos de desarrollo para dos nuevas clases de extintores. En uno de ellos, se hace detonar un explosivo en agua para producir una niebla supersónica que apaga el fuego por en-



El extintor que no apagó el fuego. Pruebas para sustitución del halón —muy usado contra incendios en motores, pero que estará prohibido a partir de enero de 1994— en una instalación militar

friamiento. En el otro —"el producto más prometedor hasta ahora", según Bennett—, un agente propulsor sólido inunda el fuego con nitrógeno o dióxido de carbono, sofocándolo.

Tal vez la mejor manera de preservar las menguantes reservas de halones sea suprimir falsas alarmas. Los actuales sistemas basados en fotodetectores producen la descarga a la primera señal de luz, cualquiera que sea su origen. Para evitar esto, la compañía Donmar de Newport Beach, en el estado de California, ha creado unos nuevos detectores que actualmente evalúa Wright, los cuales son capaces de distinguir un incendio de un destello mediante la tecnología de visión robótica.

Por el momento, nadie se atreve a proclamar una solución, y es probable que la situación todavía empeore. Para disuadir a los acaparadores, los Estados Unidos aumentaron el impuesto sobre los halones a más de 40 dólares por libra (1000 pesetas por kilogramo). Se espera que suba también mucho el precio del halón reciclado, si bien está exento de impuestos. Aun así, las líneas aéreas y los militares creen que todavía hay un buen mercado de estos productos. Detestan tener que modificar los aviones para el uso de otro compuesto—cualquiera que sea—, pero reconocen no tener idea del volumen de las existencias de halón reciclado.

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) cree que las reservas son enormes. "Cualquier compañía aérea guarda en sus centros de proceso automático más halón del que puede consumir en varios decenios", sostiene Stephen O. Andersen, de la división de ozono estratosférico de EPA. De hecho, los informes industriales estiman que tres de cada cuatro sistemas extintores de halones se instalaron en salas de ordenadores. A medida que las redes de ordenadores personales, relativamente baratas y fungibles, van sustituyendo a los costosos ordenadores centrales, prácticamente desaparece la necesidad de tales sistemas.

Los militares y la industria aeronáutica han creado hace poco bancos de halón reciclado con ánimo de irse abasteciendo de esas ricas fuentes mientras no exista un sustitutivo adecuado. Pero además queda un resquicio de salida para el momento en que se acaben las reservas: el Protocolo de Montreal permite continuar la producción de halones para "usos esenciales" —como en depósitos, submarinos y salas de control de centrales nucleares—, cuando no haya otras alternativas, ni siquiera halón reciclado.

Sin embargo la exención como uso esencial es un último recurso, deliberadamente sujeto a mil trabas administrativas. Mientras tanto, los usuarios probablemente harán cola en los bancos de halón, clamarán al cielo para que aparezca pronto un nuevo producto extintor y temblarán cuando los signatarios del Protocolo de Montreal reconsideren en la próxima primavera el acierto de permitir el libre uso del halón reciclado.

Karen Jescavage-Bernard y Anders Crofoot

Cartografía de una cuenca fluvial

Los mapas reflejan qué mueve a sus autores y usuarios. Plasman gráficamente la información, y con ello se convierten en potentes instrumentos de comunicación y convencimiento.

Convertidos en cartógrafos aficionados, hemos representado la cuenca del río Mianus. Queríamos mostrar de qué modo diferentes usos de la tierra afectan la calidad de ese río, que es la principal fuente de agua para 130.000 personas que residen en zonas contiguas de Nueva York y Connecticut. Los mapas que realizamos pusieron de relieve las áreas ecológicamente delicadas y mostraban qué partes del río eran más vulnerables a la contaminación

Una cuenca fluvial, la zona donde se avena un determinado sistema fluvial o de corrientes de agua, es como una especie de hoya cuyos bordes estuvieran delimitados por cumbres o sierras y en cuyo fondo se encontrase un río u otra masa hidrológica. Además de darnos agua para beber y un medio de recreo, las cuencas fluviales son esenciales para muchos hábitats naturales, el control del clima, la agricultura, la industria y a veces el transporte y la producción de energía. Todos vivimos en una cuenca fluvial, aunque no podamos verla. Un mapa adecuado es seguramente el mejor medio de hacerla visible.

Combinamos información procedente de distintos tipos de mapas. Primero empleamos mapas de carreteras para determinar el curso y la longitud total del río Mianus. Descubrimos así que en sus casi sesenta kilómetros atraviesa cinco ciudades, dos condados y dos estados antes de desembocar en el estrecho de Long Island.

Sabiendo ya dónde está el río y conocida su desembocadura, levantamos un mapa de papel a gran escala a partir de atlas de carreteras de condado, de un gran formato. Esos atlas resultan ideales para confeccionar mapas de cuencas porque, además de ser baratos, se consiguen sin dificultad, facilitan la información a una escala muy útil y representan en color tanto los accidentes naturales como los debidos al hombre. Compilamos páginas suficientes para que apareciesen todas las ciudades, condados y fronteras estatales, y nos esmeramos en casar las líneas del retículo y los extremos de las carreteras donde los bordes de los mapas se juntaban. Necesitamos 19 páginas de atlas, y, dado que algunas las usamos por ambas caras, tuvimos que emplear dos copias de cada atlas.

Utilizamos también mapas hidrológicos, que indican la ubicación de las divisorias de aguas. Las divisorias delimitan la cuenca fluvial, o sea, el borde de la hoya cuya agua drena el río Mianus. En los mapas hidrológicos los ríos y arroyos se representan con trazo lleno y las divisorias de aguas con trazo de puntos. Para confeccionar un mapa completo de la cuenca del Mianus necesitamos cuatro de esos mapas: un mapa hidrológico de Westchester y tres mapas hidrológicos de Connecticut sudoriental (la cuenca del Mianus abarca parte de Fairfield County, Connecticut).

De no haber dispuesto de mapas hidrográficos, hubiéramos podido emplear mapas topográficos, que, además de representar ríos y arroyos, marcan cumbres y sierras mediante líneas estrechamente espaciadas. La determinación de los límites de una cuenca hidrográfica en un mapa topográfico requiere un paso adicional: que se tracen las divisorias de aguas enlazando las alturas máximas que haya en el mapa, tarea laboriosa y que lleva tiempo.

Como un río dibujado es por naturaleza largo y fino, tuvimos que andar con cuidado para que nuestro mapa no se hiciera tan grande que resultara difícil de manejar. Decidimos que el tamaño máximo sería de 120 por 90 centímetros. A medida que la zona de Westchester iba quedando lista, llegamos a la conclusión de que la escala que tenía, de tres pulgadas por milla (aproximadamente 1:20.000) nos daría un mapa base de tamaño más o menos correcto. Los demás mapas los ajustamos a esta escala de control.

No tardamos en descubrir lo molesto que resulta trabajar con mapas enrollados; por ello, uniendo con cinta adhesiva dos trozos de cartón de desecho, construimos una carpeta que mantenía planos los mapas mientras los confeccionábamos. Una vez acabados, los guardábamos enrollados.

Confeccionar a piezas un mapa no es difícil si todas ellas están a la misma escala. Pero todos nuestros mapas estaban trazados a proporciones distintas, por lo que tres de ellos tuvimos que reconstruirlos a nuestra escala básica de 1:20.000. Lo logramos gracias a una copistería que reproducía planos de maquinaria y podía cambiar la escala de mapas grandes, y luego reproducirlos. Los mapas pequeños hay que ampliarlos por zonas, que luego se reúnen de nuevo.

Para ayudar a nuestra copistería, al pie de cada mapa dibujamos con gran precisión una recta de referencia que representaba la escala. Nos encontramos con que un mapa no

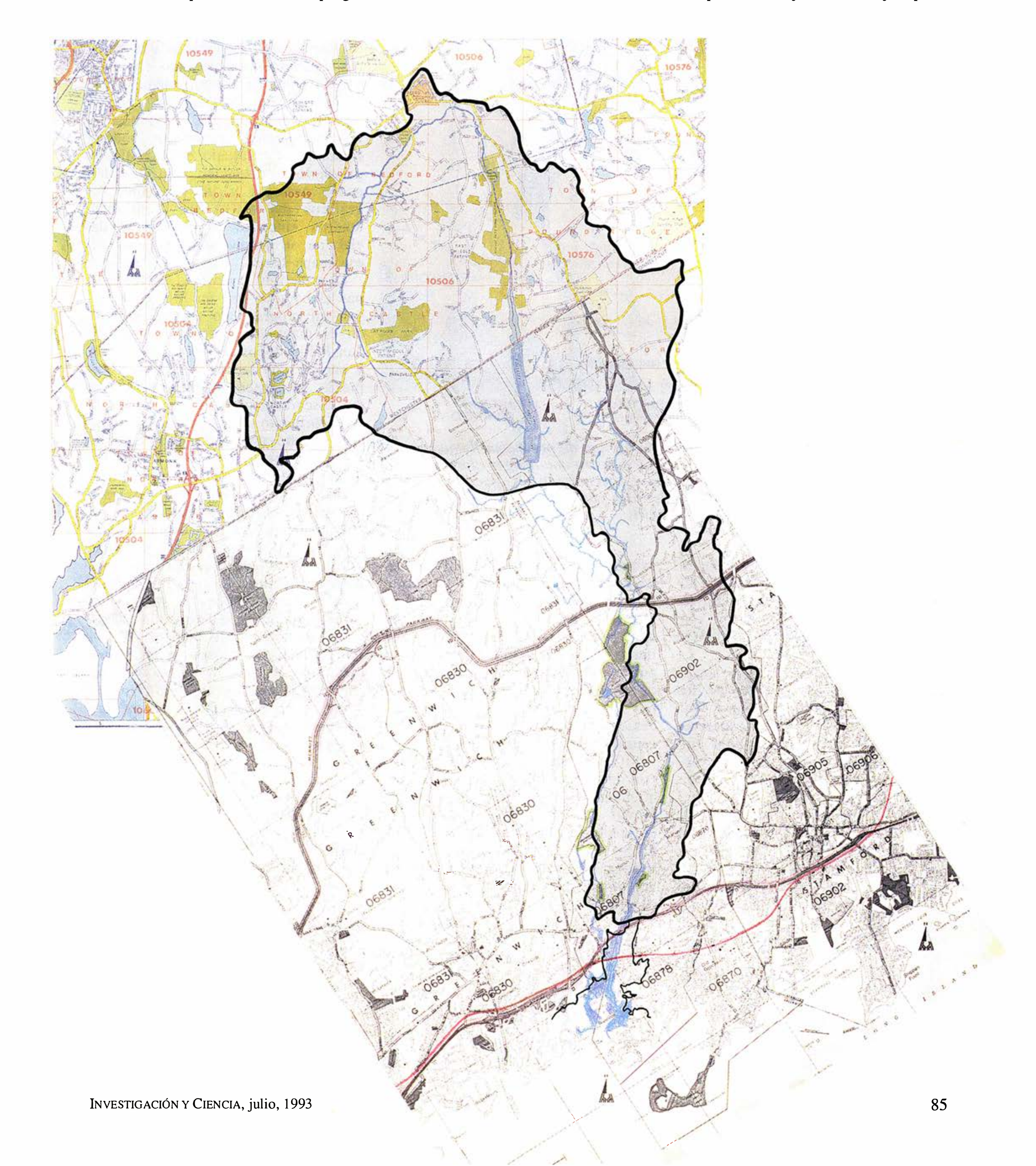
1. La cuenca del río Mianus beneficia a poblaciones de Nueva York y Connecticut. Este mapa a piezas fue creado calcando las divisorias de aguas en un superponible transparente. Las discordancias en los límites de los condados se deben a que la escala del mapa del condado de Fairfield (Connecticut) es incorrecta

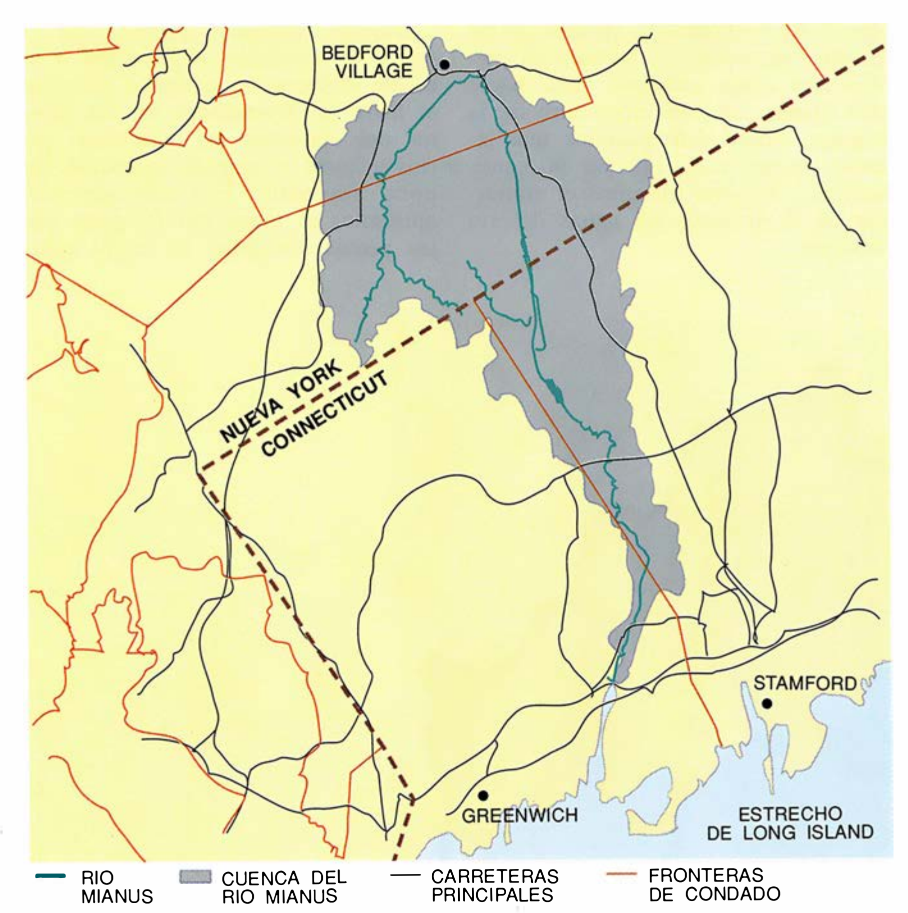
KAREN JESCAVAGE-BERNARD y ANDERS CROFOOT son socios de la organización conservacionista Westchester Land Trust, del condado de Westchester, en Nueva York. Jescavage-Bernard escribe artículos de temas ambientales, y Crofoot es consultor especialista en proyectos y representación gráfica por ordenador. El mapa de la cuenca fluvial fue llevado a cabo bajo la dirección de Crofoot y Bice C. Wilson, arquitecto y planificador. Alice Bamberger dirigió todo el proyecto, que incluía un programa de comprobación de la calidad de las aguas, otro de fines docentes y una campaña de sensibilización pública.

estaba impreso a la escala que figuraba en su leyenda, y tuvimos que dibujar una referencia de escala corregida. Otro no tenía leyenda alguna, y hubo que calcular la escala aritméticamente.

La copistería rehízo los mapas aumentando todas las líneas de referencia hasta que midieran tres pulgadas (7,62 centímetros). Iguales ya las escalas, recortamos y unimos las piezas con cinta adhesiva para hacer dos mapas, uno del río y otro de la cuenca. Sobre éste pusimos una lámina de mylar de 120 por 90 centímetros y encima trazamos el contorno de la divisoria de aguas del río Mianus.

Aunque habíamos reproducido el trozo del condado de Fairfield a la escala correcta, no encajaba bien con el trozo de Westchester en los límites del condado: las carreteras, los ríos y hasta el embalse quedaban un poco sesgados. Por consiguiente, ajustamos el mapa del río para que las piezas encajaran lo mejor posi-





2. Mapa generado por ordenador mediante un tipo de programa llamado "sistema de información geográfica" (SIG), que muestra una imagen clara y exacta de la cuenca hidrográfica del río Mianus. La tecnología SIG puede asimismo admitir informaciones no cartográficas tales como estadísticas e imágenes por satélite

ble. Sospechamos que el uso de escalas incorrectas es más frecuente de lo que generalmente se cree; conviene guardar un sano escepticismo respecto a la precisión y objetividad supuestas de los mapas.

Como la copistería no pudo hacernos reproducciones en color de los mapas reconstruidos, perdíamos una valiosa información al desaparecer los azules y verdes de las vías fluviales y los parques, así que coloreamos a mano los detalles más importantes.

Cuando colocamos el superponible de mylar con las divisorias sobre el mapa en papel del río, la cuenca del Mianus apareció al instante en el paisaje. El cuadro era otro, mucho más comprensivo, con las relaciones entre el ámbito natural, el artificial de las carreteras y el abstracto, de orden político.

El costo total de este experimento subió a unos 140 dólares, de los que aproximadamente 60 cubrieron el precio de los mapas, 24 el del mylar y 60 el de las reproducciones.

Un procedimiento cartográfico más avanzado técnicamente es el empleo de ordenador y un tipo de soporte lógico llamado "sistema de información geográfica", o SIG, con el que pueden combinarse mapas de tierras anegadas, pendientes y terrenos con datos no cartográficos tales como fotografías aéreas, imágenes por satélite, tablas estadísticas, índices de calidad de aguas y registros censales.

SIG no trabaja con mapas sino con datos digitalizados, a los que los aficionados habrán de tener acceso previo. Cada estrato de datos recibe el nombre de espacio de cobertura. El Servicio Geológico de los Estados Unidos subdivide los espacios de cobertura en zonas geográficas que llama cuadrángulos. La cuenca del Mianus se extiende por cuatro cuadrángulos, y necesitamos cuatro espacios de cobertura por cada cuadrángulo, para los límites municipales, los límites de la cuenca fluvial, las vías de comunicación y los ríos, respectivamente.

El SIG empleado en la versión informática del proyecto Mianus fue el ARC/INFO, que es un producto del Instituto de Investigación de Sistemas Ambientales, empresa de productos informáticos radicada en Redlands (California).

Si bien la tecnología SIG no cesa de abaratarse, aún es tan cara que la emplean sobre todo organizaciones gubernamentales y grandes empresas. Aprender su manejo requiere bastante tiempo. Por ello, lo normal es que los cartógrafos aficionados que quieran emprender un proyecto con SIG habrán antes de contar, además, con la cooperación de personal experto para la confección del mapa básico. Los cartógrafos aficionados podrán examinar el resultado en pantalla, y guardarlo en disquetes. Con un ordenador personal y un programa de gráficos del estilo del Paintbrush tendrán entonces la posibilidad de elaborar su propio mapa a partir de ese mapa base.

La exactitud y claridad de los mapas elaborados con un SIG constituyen un progreso de gran magnitud: en el mapa realizado manualmente, aun habiéndonos esmerado en cortar y encajar con la mayor precisión las piezas, son ostentosamente evidentes las discordancias. Por desgracia, el procedimiento digitalizado es también mucho más caro: cada espacio de cobertura cuesta del orden de veinte dólares, y necesitamos dieciséis; hay que contar además los gastos del utillaje informático.

Por supuesto, mapas emparentados con el de la cuenca fluvial permiten otras aplicaciones: la representación de avistamientos de aves migratorias para avalar peticiones de protección o restauración de determinados hábitats, estacionalmente críticos; o hallar la ubicación idónea de un nuevo pozo para un pueblo tomando nuestro mapa base generado por ordenador y representando en él los servicios de agua ya existentes, la geología superficial y subsuperficial, los suelos de la zona y la parcelación del terreno.

Si desean más información sobre la realización de mapas base de cuencas fluviales, diríjanse al Wetchester Land Trust, 31 Main Street, Bedford Hills, NY 10507.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE MAP CATALOG: EVERY KIND OF MAP AND CHART ON EARTH AND EVEN SOME ABOVE IT. Joel Makower. Vintage Press, 1986.

GIS WORLD. 12 números al año. 155 East Boardwalk Drive, Suite 250, Fort Collins, CO 80525. Teléfono: (303)223-4848.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Ascenso y caída del Emperio Lunar

Jean-Jacques LeMaire ha descubierto en el Museo del Louvre un cartapacio que contiene papeles inéditos de Julio Verne, entre ellos un capítulo inédito del Viaje a la Luna. *LeMaire ha consentido generosamente en que sea publicado en* Investigación y Ciencia.

El Mayor Elphinstone paseábase intranquilo bajo el domo del observatorio mientras J. T. Maston se mantenía pegado al ocular del telescopio principal. "Sigo sin verles", dijo Maston con preocupación. "Claro que si la cantidad de algodón pólvora hubiera sido erróneamente estimada aunque fuera sólo en un uno por ciento, podrían retrasarse varias horas. Aún es pronto para temer que Barbicane, Nicholl y Ardan hayan podido correr una suerte irreparable."

"Hemos de conservar el optimismo", suspiró Elphinstone, y se estremeció. "¡Hace un frío endemoniado aquí arriba, en Long's Peak! Vayámonos a descansar una hora."

Maston accedió de mala gana, y ambos caballeros se encaminaron a buen paso hacia la tibia sala del edificio principal. Un sirviente les trajo café caliente y bocadillos.

El mayor se fijó en un mapamundi adosado a la pared: los territorios alemanes en naranja; los franceses en verde; los americanos en morado y el Imperio Británico en color rosado.

"¡Nosotros nos encargaremos de rectificar ese mapa!", jactóse Elphinstone.

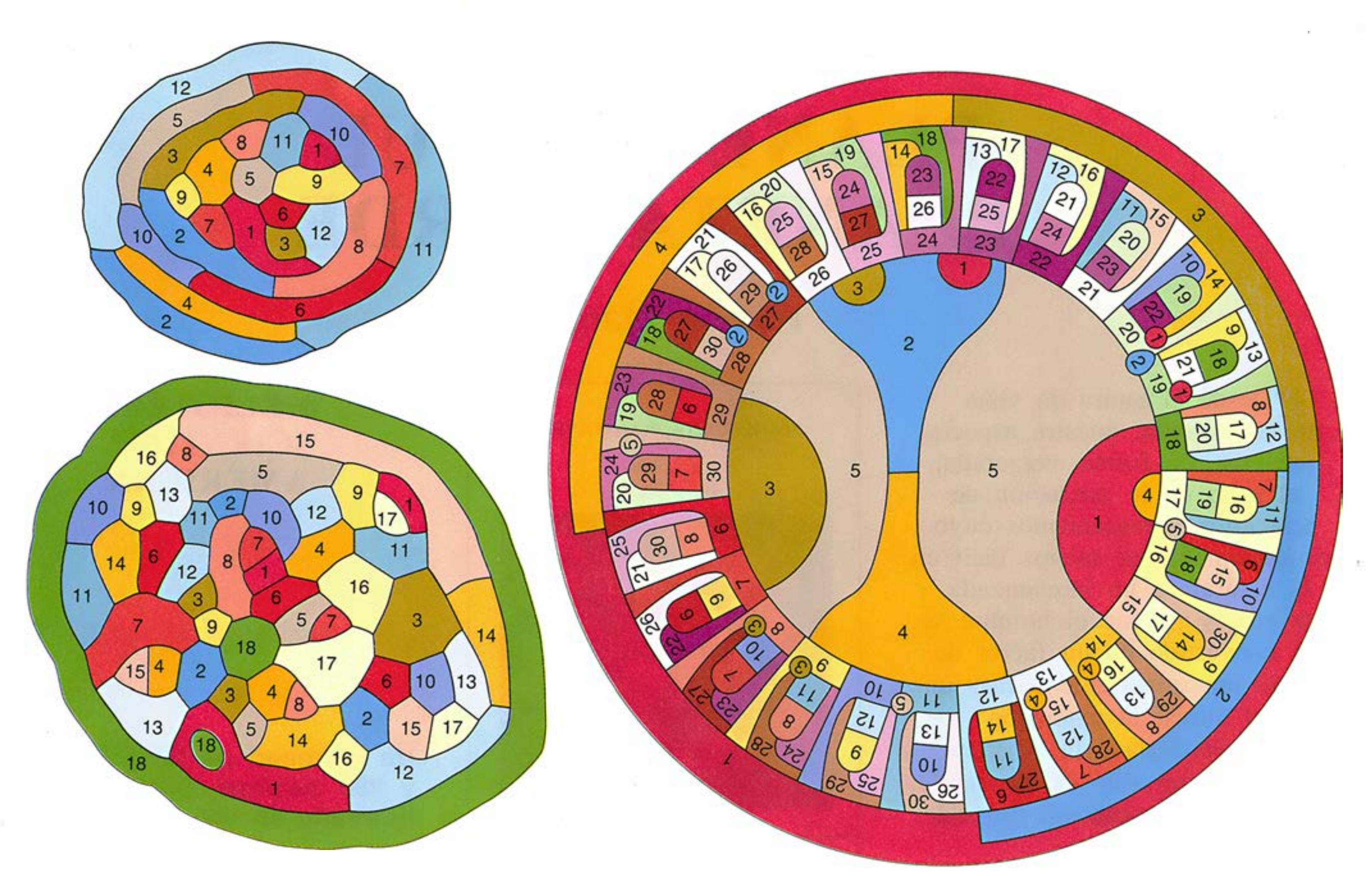
"Perdone, ¿cómo ha dicho?"

"Pronto le anexaremos un mapa de la Luna... ¡y será todo él de color morado! ¡Una colonia americana en la Luna! Puede que el sol nunca se ponga en el Imperio Británico, pero la Colonia Lunar Americana se elevará sobre todas las naciones de la Tierra!"

"¡Ah, ya!", musitó Maston. "Puede que también haya algo de verde allá arriba."

"¿Qué quiere usted decir?"

"En el mapa de la Luna, se entiende", dijo Maston en tono de disculpa. "Tenga presente que Ardan es francés." Maston prefirió cambiar de tema y



*1. LA PESADILLA DEL CARTOGRAFO: Si tuviéramos que confeccionar un mapa de varios imperios, cada uno de los cuales constase de dos países, ¿cuál sería el número máximo de colores necesarios para garantizar que todos los territorios de un mismo imperio sean de un mismo color, pero países fronterizos de imperios distintos tengan con seguridad colores distintos? El mapa superior izquierdo requiere 12 colores; está demostrado que ningún mapa compuesto por imperios de dos territorios podrá necesitar más de 12. Cuando los imperios constan de tres países, el número máximo de colores necesarios es 18 (*abajo, a la izquierda*); si constan de cinco, el total es 30 (*derecha*)

se acercó al mapa. "Me pregunto por qué han de usar los cartógrafos tantas tintas. Hay por lo menos una docena."

"¿Y eso qué?"

"No hace mucho, un familiar mío, que es matemático en Harvard, me contó que alguien llamado Percival Heawood ha demostrado que cualquier mapa trazado sobre la superficie del globo puede ser coloreado con no más de cinco colores. El problema fue planteado por un inglés, Francis Guthrie, en 1852."

(*Nota de la redacción: En 1879, Arthur Kempe, abogado y miembro de la Sociedad Matemática de Londres, afirmó disponer de una demostración de que cuatro colores son siempre suficientes; sin embargo, once años después Heawood descubrió en aquella demostración un error sutil. Durante casi un siglo nadie supo de cierto si todo mapa podría ser coloreado con cuatro colores. Finalmente, en 1976, con ayuda de un potente ordenador, que desempeñó un papel esencial, Kenneth Appel y Wolfgang Haken, de la Universidad de Illinois, demostraron que nunca son necesarios cinco colores.*)

Elphinstone reflexionó un momento. "Pero, sin duda, un color será suficiente."

"¿Cómo...? Ah, ya. Olvidé mencionar que los países adyacentes han de recibir colores distintos."

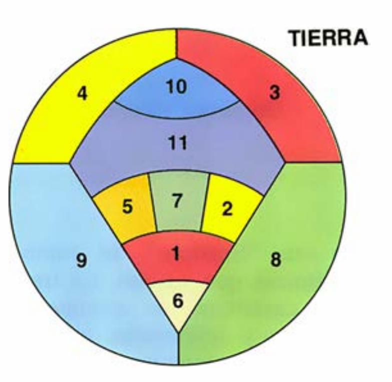
"Ya entiendo", dijo el mayor, "¿Y qué sucede si hay 100 países adyacentes con un solo punto común, como las raciones de una tarta?"

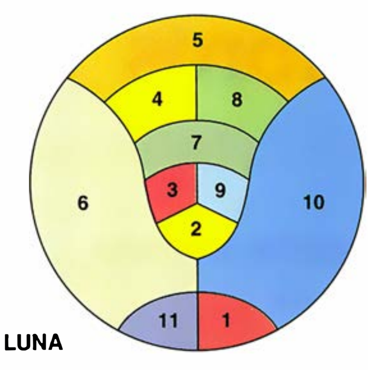
"Me parece que debo aclarar mis términos", respondió Maston. "Por 'adyacente' quiero decir que comparten una porción de frontera común de longitud no nula. Ahora bien, observo que este mapa parece utilizar muchos más colores de los necesarios. Aunque supongo que se utilizaron otros criterios además de la mera adyacencia."

Elphinstone terminó su café y pidió un brandy. De repente Maston se incorporó de un salto, animadísimo. "Acabo de recordar una generalización del problema del coloreado de mapas," explicó. "Supongamos que en lugar de países consideramos imperios. Los países pertenecientes al mismo imperio han de recibir el mismo color. Diferentes imperios pueden ser también del mismo color, siempre que se respete la regla anterior: si dos países son adyacentes, han de tener colores diferentes."

"Lógico."

"En efecto. El sobreentendido, desde luego, es que, si dos imperios poseen territorios adyacentes en algún punto del globo, tales imperios han de recibir distinto color. Permítame añadir





2. EL INCUBO DEL CARTOGRAFO: ¿Cuántos colores se necesitan en el peor de los casos para un mapa en el que cada imperio consta de dos países, a saber, la metrópolis de la Tierra y una colonia en la Luna? Como vemos arriba, a veces se necesitan nueve colores, pero no se sabe si hay algún mapa de este tipo que requiera al menos 10, 11 o incluso 12 colores

que un imperio formado por dos países es un bimperio; uno formado por tres países es un trimperio, y así sucesivamente. Por lo tanto, un imperio que conste de m territorios será un m-perio, o sea un 'emperio'. Pido disculpas por el calembur; es muy malo."

"Sí", murmuró el mayor, "debe pedirlas".

"Diré en defensa que el chiste no es mío, sino de Heawood."

"Me pregunto si Heawood se habría dado cuenta de que un imperio con x países sería llamado un ex-imperio."

"*Touché*", concedió Maston. "Sea como fuere, Heawood demostró que se necesitan como mucho 12 tintas para poder colorear un cierto mapa dado, formado por bimperios. Heawood descubrió un mapa con 12 bimperios mutuamente adyacentes [*véase la ilustración de la página contigua*] que necesitaban a la fuerza colores distintos, demostrando así que 12 es en general el número de colores mínimo posible. Heawood fue más lejos y demostró que ningún mapa consistente en m-perios requiere más de $6m$ colores."

"¿Y llegó a demostrar que este número es también el óptimo?"

"No, no lo consiguió. Pero sí conjeturó el resultado. De hecho, sugirió que siempre existe un mapa con justo $6m$ emperios mutuamente adyacentes."

(Nota de la redacción: En 1984, Brad Jackson, de la Universidad estatal de San José, y Gerhard Ringel, de la Universidad de California en Santa Cruz, demostraron la conjetura de Heawood. En la página contigua se muestra un mapa de 18 trimperios mutuamente adyacentes, descubiertos por Herbert Taylor, de la Universidad de California del Sur, así como un mapa con 30 quintuperios mutuamente adyacentes.)

El mayor pidió un segundo brandy. "¿Sería distinto si algunos de los países de un m-perio estuvieran en la Luna?", quiso saber.

Maston reflexionó un momento. "Probablemente. Después de todo, ahora estamos considerando mapas dibujados sobre un par de esferas, en lugar de una. Imagino que el caso más sencillo sería el de que cada país de la Tierra poseyera un bimperio, cuyo segundo territorio fuese una colonia lunar. Estoy convencido de que métodos similares a los de Heawood demostrarán que el número máximo de colores estará comprendido entre ocho y doce."

(*Nota de la redacción: Rolf Sulanke, de la Universidad Humboldt de Berlín, demostró que algunos de tales mapas exigen nueve colores, pero se ignora todavía si la respuesta correcta es 9, 10, 11 o 12. En el caso de tres planetas, el número óptimo de colores es 16, 17 o 19; en el caso de que m sea mayor o igual que 4, el número es 6m – 2, 6m – 1 o 6m.*)

Elphinstone y Maston desanduvieron el camino al observatorio.

"¡Por fin! ¡Ahí está!", exclamó jubiloso Maston.

"¡Pronto tendremos un mapa nuevo con la Luna teñida en morado!", repuso el mayor.

"Y una pincelada de verde", añadió Maston.

"Sí, desde luego", concedió Elphinstone. "¡Pero... qué es esto! ¡Estoy viendo varias naves más."

Llegó en ese mismo momento un mensaje telegráfico: "AGENCIA INTERNACIONAL DE NOTICIAS INFORMA QUE MISILES TRIPULADOS HAN SIDO DISPARADOS HOY HACIA LA LUNA POR ALEMANIA, ARGENTINA, BELGICA, BRASIL, CHINA, ESPAÑA, LOS EE.UU., GRAN BRETAÑA, HOLANDA, JAPON, PORTUGAL Y RUSIA."

El mayor se quedó mirando fijamente a Maston. "Me parece que había dicho usted morado, verde y entre siete y 10 colores más, ¿verdad?"

Libros

Domingo Fletcher, F. Gracia, Luis Alonso y Juan P. de Nicolás

España Romana

Sagunto

SAGUNT. ANTIGÜEDAD E ILUSTRACIÓN, por José María Estellés y F. Jordi Durá. Vol. 9 de la serie "Arxius i Documents". Alfons el Magnanim—Generalidad Valenciana; Valencia, 1991.

En el prólogo, Jaime Siles, catedrático de la Universidad de Valencia, de cuyo departamento de filología clásica son, asimismo, profesores los autores del libro, hace una documentada exposición de las distintas maneras de ser consideradas las ruinas en el Siglo de Oro y en el siglo XVIII, con la Ilustración. En el primer caso, la poesía española sincretiza diversas fuentes y modelos en los que "Sagunto es un nombre más añadido a las ruinas clásicas", mientras que, a partir del siglo XVIII, los eruditos pasan de la emoción a la razón, dedicando su atención a sus orígenes, historia, etc., de los monumentos. Estas reflexiones de Siles van acompañadas de múltiples referencias a autores representativos de una y otra tendencia, y finaliza destacando la trascendencia del libro, que nos permite conocer "un aspecto concreto de la Ilustración dieciochesca valenciana".

En la introducción, los autores justifican el motivo que los llevó a publicar las cuatro monografías constitutivas de la obra, que no fue otro que el deseo de poner a disposición de los estudiosos el "gran acervo de escritos de nuestros Ilustrados" y comienzan por la "Epístola" del deán Manuel Martí que consideran fue la impulsora de los tres restantes textos, debidos a la pluma de J. Manuel Miñana. Hecha la justificación, explican que los textos son estudiados y comentados desde el punto de vista de su especialidad, pero dedican unas páginas previas a hablar de las características de los teatros griegos y romanos, centrando su atención en el de Sagunto.

En la segunda parte de la obra se inicia el estudio de los textos, el primero, como ya hemos dicho, el "De Theatro Saguntino Epistola" de Martí, del que dan la biografía y referencia de los manuscritos y ediciones de esta "Epístola", así como de las polémicas que suscitó. La traducción al castellano se acompaña de comentarios y referencias bibliográficas del mayor interés.

El segundo manuscrito estudiado es el "De Theatro Saguntino Dialogus" de J. Manuel Miñana, del que, igualmente, reseñan su biografía, manuscritos y ediciones. A continuación sigue la narración del autor sobre el origen y destrucción de Sagunto y su Teatro, del que se estudia su antigüedad, emplazamiento, estructura, graderío, pórtico, púlpito, escena, etc., todo ello con gran lujo de detalles, que son prueba de la amplia información que Miñana tenía sobre el tema.

El tercer texto, también de este autor, "De Circi Antiquitate Dialogus", está dedicado a la estructura y antigüedad del Circo Saguntino, aportando datos muy interesantes para su conocimiento, ya que, por desgracia, este monumento desapareció hace unos años bajo la construcción de unas manzanas de casas, sin que su excavación y estudio, iniciados por la Universidad de Valencia, llegaran a término.

El cuarto y último texto, "Saguntinea", esbozo de un poema inacabado, del que hasta el presente se contaba con escasas referencias, es estudiado señalando las influencias que los autores romanos de la Antigüedad ejercen sobre Miñana y la exuberante imaginación que éste aporta al poema.

Los tres textos reseñados de Miñana, también traducidos al castellano, se acompañan con las oportunas notas bibliográficas, básicas para la mejor comprensión de los mismos. Sigue un apéndice en el que se recogen tres manuscritos: el de Dempere sobre el Teatro Sagunto, basado en la "Epístola" del deán Martí, texto que se conserva en el Monasterio del Puig de Santa María; las "Observations on the description of de theatre of Saguntum" (año 1789), versión inglesa de W. Conyngham de la carta que remitiera Martí a la Real Academia Irlandesa, y, finalmente, el estudio de Schiassi "De Typo Ligneo Theatri Saguntini" (año 1836). Los tres documentos poco difundidos, por lo que es de agradecer su inclusión en este libro.

La obra, reseñada con brevedad, por exigencias de espacio, es, desde el prólogo, una valiosa aportación de datos, comentarios y bibliografía, lo que unido a unas fluidas versiones castellanas de los originales latinos de Martí y Miñana, la hacen imprescindible para el estudio de la historia y cultura valencianas en el siglo XVIII. (D. F.)

Electromagnetismo

Maxwellianos

THE MAXWELLIANS, por Bruce J. Hunt. Cornell History of Science Series. Cornell University Press. Ithaca, New York, 1991.

Cuando James Clerk Maxwell da a la luz la primera edición de su *Tratado sobre la electricidad y el magnetismo* en 1873 manifiesta en el prólogo que su propósito es compendiar el saber eléctrico de la época, tanto en sus aspectos teóricos como en los experimentales. Pero, inmediatamente a continuación, aclara que, a diferencia de los textos habituales de quienes llama "los matemáticos", el suyo seguirá el método de Faraday, traduciendo al lenguaje matemático sus ideas. Basta una ojeada cursoria del *Tratado* para convencerse de lo concienzuda que fue esta versión y, dada la potencia del aparato matemático que Maxwell utiliza, la razón de la distinción parece evaporarse. Pero es que la diferencia fundamental, según aclara a renglón seguido, estriba en que mientras los designados matemáticos explican los fenómenos eléctricos y magnéticos mediante centros de fuerza que actúan a distancia a través de un espacio que no interviene en el proceso, para Faraday la explicación ha de hacerse con conceptos que respondan a mecanismos de acción reales desarrollados en un medio que es parte inseparable del proceso mismo: campos y líneas de fuerza actuando en un medio material, al que se denominaba el éter.

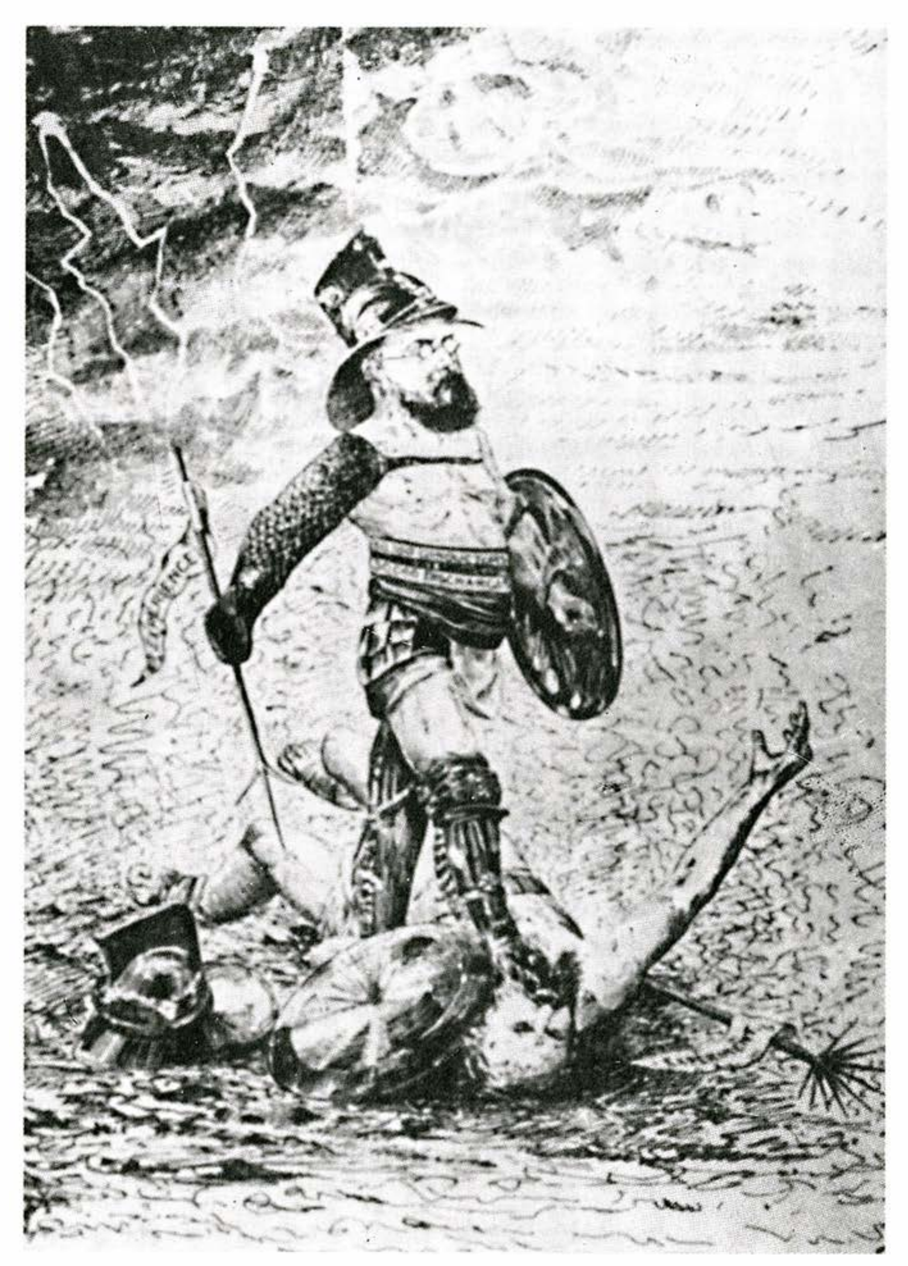
A pesar de que "en general el resultado de ambos métodos coincidía, explicándose los mismos fenómenos y deduciéndose las mismas

leyes", cuando Maxwell muere seis años después, en 1879, su teoría no ha tenido más que una aceptación minoritaria en la propia Inglaterra, y ni siquiera es bien comprendida. Desde la perspectiva actual, en que se la considera fundamental y goza de un prestigio comparable al de la newtoniana, esto resulta casi inconcebible. ¿Qué sucedió entre la muerte de Maxwell y el comienzo del siglo XX para que se produjese un cambio tan radical?

Esta es la pregunta principal que trata de contestar el libro de Hunt. Lo que sucedió fue que las ideas de Maxwell fueron objeto del trabajo y la actividad de un grupo de personas, ninguna de las cuales tuvo relación personal directa con él, que revisaron, clarificaron y trataron de someter a comprobación experimental el contenido de su obra. En la forma en que la presentaba el *Tratado*, la teoría de Maxwell era confusa y desmañada, aparte de contener algunos errores. Ni siquiera las ideas capitales del propio Maxwell (desplazamiento, ondas electromagnéticas) quedaban bien deslindadas de las de sus predecesores, Faraday y Thompson. No resultaba tampoco práctica, p. ej. en el tratamiento de los problemas de propagación que el desarrollo del telégrafo y el teléfono habían puesto de manifiesto. Requería revisiones y clarificaciones sustanciales, en sus principios físicos y en su expresión matemática, antes de que pudiese alcanzar mayor aceptación y llegar a tener un uso generalizado. Esta fue la tarea que realizaron los jóvenes maxwellianos a lo largo de los años ochenta y noventa del siglo pasado: G. F. FitzGerald, O. Lodge, O. Heaviside, J. H. Poynting, H. Hertz y J. Larmor.

De hecho hubo otra línea maxwelliana, que podría llamarse ortodoxa: la de sus partidarios y seguidores en Cambridge, donde Maxwell había sido profesor y director del recién fundado Cavendish Laboratory. Pero en Cambridge la obra de Maxwell fue más venerada que leída y se la apreció más por sus aspectos matemáticos que como teoría física propiamente dicha. A este grupo pertenecían los revisores de las sucesivas ediciones del *Tratado* (Maxwell no pudo llegar a ocuparse más que de un tercio de la segunda edición antes de su muerte). En la tercera, fechada en 1891 y a cargo de J. J. Thompson, los nombres de FitzGerald y Heaviside son los únicos que aparecen citados, una vez cada uno y de manera muy formal, en sendas notas a pie de página, a pesar de que para entonces buena parte del trabajo renovador ya estaba hecho.

Los héroes principales de la historia son George Francis FitzGerald, Oliver Lodge y Oliver Heaviside, no necesariamente en este orden; en menor medida, Heinrich Hertz y Joseph Larmor. Los tres primeros tenían personalidades muy distintas, pero sus diferentes aptitudes y características resultaron decisivas para la elaboración y el triunfo de la nueva síntesis maxwelliana. FitzGerald, el profesor apreciado de Trinity College de Dublin y fuente continua de ideas para sus compañeros de grupo; Lodge, también profesor de física en Liverpool, gran experimentalista y divulgador; y el más extraño de todos, Heaviside, el ex-telegrafista huraño de las afueras de Londres, pero dotado de un gran sentido crítico y de una extraordinaria capacidad para elaborar conceptos teóricamente rigurosos y a la vez orientados a la práctica. Fue él quien más profundamente reelaboró la teoría y cambió su formalismo matemático; de hecho, las famosas "ecuaciones de Maxwell" no se encuentran en ningún trabajo de Maxwell; fue Heaviside quien redujo las 13 ecuaciones del *Tratado* a las cuatro conocidas, dándoles su forma actual, más clara, simétrica y general (la autoridad de Hertz, que había llegado independientemente a las mismas fórmu-



Caricatura de W. H. Preece, representando a los "prácticos", en triunfo sobre los "teóricos", en la persona de Oliver Lodge. Tomado de Electrical Plant, *1988*

las, impulsó su adopción en el continente europeo). Parecido a un personaje de Dickens hecho realidad, la peripecia personal de Heaviside posee mayores recursos dramáticos que las de los restantes, por lo que, en alguna medida, las domina en el contexto del libro.

No deja de ser curioso que dos de las personas más influyentes en este episodio (a saber, el propio Faraday y Heaviside, pudiera decirse que el principio y el fin de todo él) tuviesen dificultad en su tiempo para ser reconocidos como miembros de la comunidad científica y compartiesen un cierto carácter de "aficionados", el uno por la naturaleza experimental y no matemática de sus trabajos, el otro por provenir de círculos "técnicos" y estar alejado de los académicos. Faraday contó con la ayuda de Maxwell para que sus ideas adquiriesen estatuto científico, al formularlas y desarrollarlas matemáticamente; las actuaciones de FitzGerald y Lodge entre sus colegas académicos fueron decisivas para que las de Heaviside fuesen conocidas y apreciadas, hasta cierto punto, en los medios establecidos, en las que eran ignoradas no por falta de matemáticas, sino por provenir de un extraño.

El autor traza su detallada historia desde diversos puntos de vista simultáneamente. La evolución de los conceptos y aspectos fundamentales de la teoría se sigue con detalle y rigor, pero el hecho de que la mayor parte de los materiales utilizados y citados pertenezcan a correspondencia intercambiada entre los protagonistas les da a éstos un relieve y una presencia continuas. Puede seguirse así paso a paso y día a día la gestación y elaboración colectiva de las ideas, las dudas, las críticas recíprocas, los errores compartidos, el intercambio de información. FitzGerald y Lodge constituyeron el núcleo inicial del grupo, desde que se conocieron y se hicieron amigos en agosto de 1878 en una reunión científica, compartiendo entre otras cosas su entusiasmo por la teoría de Maxwell. Heaviside, por su parte, había empezado a publicar artículos sobre propagación electromagnética en una revista profesional titulada *The Electrician* en 1882. Su propósito principal era el esclarecimiento de la transmisión de señales eléctricas por cable, pero ya utilizaba como base la teoría de Maxwell del éter como dieléctrico. Una serie de artículos publicados en *Philosophical Magazine* en 1888 hicieron que su nombre y la magnitud de su trabajo sobre Maxwell fuese conocido por algunos investigadores importantes, como Rayleigh y Lodge. Es también este mismo año cuando comienza su relación epistolar con Lodge, posteriormente con FitzGerald y su conexión estrecha con el grupo.

Este año de 1888 trajo además otro acontecimiento decisivo: en el mes de marzo, Heinrich Hertz había detectado en Alemania las ondas electromagnéticas que Lodge y FitzGerald llevaban tanto tiempo buscando. Esto constituía la confirmación empírica más clara de la teoría de Maxwell, a pesar de que éste nunca se refirió a otro tipo de ondas electromagnéticas que no fueran las luminosas y es incluso verosímil que considerase imposible su generación por medios electromagnéticos. Maxwell no previó la consecuencia de mayor importancia teórica y práctica de su propia teoría: la generación de ondas electromagnéticas por una corriente oscilante. Efectivamente, los descubrimientos de Hertz confirmaban la teoría de Maxwell, pero, como diría en alguna ocasión Heaviside, se trataba de un "Maxwell corregido" por sus sucesores. Se estableció un contacto epistolar inmediato entre nuestros tres maxwellianos y Hertz, quien además fue invitado a visitar Inglaterra al año siguiente, y pasó a convertirse en un nuevo elemento del grupo.

El período de esplendor tanto del grupo como de la teoría de Maxwell abarca precisamente desde 1888 a 1894. La cohesión, los desarrollos teóricos, su actividad divulgadora y su prestigio social no hacen sino aumentar. La teoría, por su parte, recibió general aceptación y pasó a constituir la nueva ortodoxia. Pocos años después de 1900, diversas circunstancias, entre ellas el fallecimiento de alguno de sus miembros, hicieron que el grupo de los maxwellianos dejase de tener entidad. En cuanto al reinado de la teoría, aunque nunca discutido, sí resultó desplazado del centro de atención por los nuevos desarrollos de la física: la teoría atómica, el descubrimiento del electrón (y con él la corporeización de la corriente eléctrica) y, muy poco después, las revolucionarias ideas de Einstein.

Aunque términos como éter o corriente de desplazamiento abunden, lógicamente, en el libro, el tratamiento sea riguroso, y minucioso el seguimiento de la evolución de algunos conceptos, su lectura no presentará especial dificultad para cualquier persona que, con un bagaje muy general de conocimientos sobre electricidad, se interese por la historia de las ideas y de la cultura en general. Es más, le resultará muy estimulante por el detalle y la viveza con que el autor despliega ante nuestros ojos el surgimiento, la elaboración y la asimilación de unos conceptos que hoy se dan por supuestos y no suscitan otra actitud que una cierta reverencia. Se asiste a su desarrollo casi como si de una gestación biológica se tratase, en un contexto social e histórico muy concreto, pero dotado de gran riqueza e interés desde múltiples puntos de vista. El estilo literario de Hunt hace además que el libro se lea con la urgencia que caracteriza a las buenas obras de intriga. Así, la crónica de los acontecimientos que tuvieron lugar con ocasión de la reunión celebrada en Bath por la British Association for the Advancement of Science o la intensidad de la polémica entre "eléctricos teóricos y prácticos", por poner algún ejemplo, nos permiten sumergirnos en el pluralismo y la riqueza de una sociedad muy distinta de la actual, que la ignorancia nos suele inducir a minusvalorar. En este caso, los hechos son ciertos y están rigurosamente documentados. ¿Qué más se puede pedir? (F. G.)

Institución de la ciencia

Academias

SOLOMON'S HOUSE REVISITED. THE ORGANIZATION AND INSTITUTIONALIZATION OF SCIENCE. Dirigido por Tore Frängsmyr. Science History Publications; Canton, 1990.

QUEEN CHRISTINA OF SWEDEN AND HER CIRCLE. THE TRANSFORMATION OF A SEVENTEENTH-CENTURY PHILOSOPHICAL LIBERTINE, por Susanna Akerman. E. J. Brill; Leiden, 1991.

PROMOTING EXPERIMENTAL LEARNING. EXPERIMENT AND THE ROYAL SOCIETY 1660-1727, por Marie Boas Hall. Cambridge University Press; Cambridge, 1991.

A COMPANY OF SCIENTISTS. BOTANY, PATRONAGE, AND COMMUNITY AT THE SEVENTEENTH-CENTURY PARISIAN ROYAL ACADEMY OF SCIENCES, por Alice Stroup. University of California Press; Berkeley, 1990.

Con motivo del 250 aniversario de la fundación de la Real Academia Sueca de las Ciencias se organizó un simposio internanacional

para debatir el interés de las instituciones no universitarias y su importancia en el progreso del saber desde los años de la revolución científica hasta nuestros días. Las ponencias y comentarios se recogieron en *Solomon's House Revisited. The Organization and Institutionalization of Science.*

Desde mediados del siglo XVII, la sede de todo conocimiento, la casa de Salomón de la que habla Francis Bacon en la *New Atlantis* se convirtió en espejo donde mirarse y modelo a realizar. En ese librito incompleto que escribió el principal impulsor del empirismo en 1627 se dibuja una utopía de la ciencia futura, una isleña ciudad ideal cuyos habitantes se consagran a descubrir las fuerzas de la naturaleza para dominarlas.

A diferencia de las sociedades renacentistas que le precedieron, hay en la baconiana ciudad-academia, constituida por 36 miembros, una auténtica división y racionalización del trabajo, que toma cuerpo en los comités y subcomités de las congregaciones que le imitaron: Regia Sociedad Londinense (creada en 1660), Real Academia de Ciencias de París (1666), Real Academia Prusiana de Ciencias (1700), Academia Imperial de Ciencias de San Petersburgo (1725) y Real Academia Sueca de las Ciencias (1739), por citar sólo las principales. Distinto en muchos casos fue su origen, pero todas buscaron elevar el nivel económico de su respectivo país a través del cultivo de las ciencias experimentales y la tecnología, así como del uso de la lengua vernácula como vehículo de expresión científica, aspectos ambos insuficientemente atendidos en las universidades.

Nacieran de un movimiento asociativo espontáneo (la Regia Sociedad de Londres), respondieran a una decisión del monarca (la Academia de París) o tuvieran un origen mixto (Real Academia Sueca), todas se afanaron por mantenerse independientes del poder, sin abdicar de su propósito regenerador, como se desprende por ejemplo de los eulogios, que resaltaban cuán beneficiosas habían sido para la sociedad de su tiempo la actividad científica y la calidad humana del homenajeado. Era esa la mejor manera de ir promoviendo el reconocimiento público de la ciencia experimental, vehiculada, para mayor eficacia, por las revistas oficiales.

En buena medida, el carácter abierto de las reuniones y la contrastación de los ensayos o logros realizados en otras partes facilitó que se



Cristina de Suecia (1626-1689)

disipara la nube que envolvía muchos supuestos saberes; ocurrió así con la alquimia y su doblegamiento ante la química. Una nota ligada con la anterior es el sentimiento de universalidad, por encima de las fronteras nacionales, que comenzaba a arraigar entre los miembros integrantes; D'Alembert se gloriaba de la confirmación de la forma newtoniana de la Tierra por parte de Maupertuis, que desmoronaba la tesis cartesiana defendida por Cassini: "uno puede ser ciudadano cabal sin tener que adoptar la física de su país".

La promoción de la técnica constituía, en el capítulo de los supuestos heurísticos de las academias, no tanto la mera prolongación práctica de la teoría cuanto su punto de arranque, o modelo al menos; de ese tenor fue, para el desarrollo de la termodinámica, la máquina de vapor. Si bien lo normal, en la historia de la ciencia, ha sido la mutua imbricación: Newton precisó cristales libres de burbujas para sus prismas, Faraday necesitó platino maleable para sus electrodos y Alfvén no pudo diseñar su betatrón sin los potentes generadores que estaban empleándose ya en la industria.

La veintena larga de participantes en el simposio desmenuzan esos y otros aspectos, de ayer y de hoy (los premios, sistemas de evaluación, competitividad, financiación, relación de ciencia y poder, etcétera), en seis sesiones de nivel sobresaliente.

Pero la fundación de la Academia Sueca de las Ciencias no era sino la culminación de un proceso que tuvo en la reina Cristina (1626-1689) su motor y origen. Minerva de su tiempo, rodeada de contradicciones, llamada "reina de la casa de Salomón", Cristina de Suecia recogió e impulsó, a la vez, las inquietudes intelectuales del siglo de oro de Europa, el de Descartes y Gassendi, Pascal y

Leibniz, Galileo y Borelli. Sobre ella se han escrito biografías dispares y despiadadas. Unos admiran la entereza de quien, por su conversión al catolicismo, es capaz de abdicar del trono en plena juventud. Otros consideran este gesto un acto frívolo más de una mujer libertina y llevan al primer plano su constante devaneo por todas las heterodoxias. Participa de este segundo enfoque, pese a un deseo de superar los antagonismos extremos, Susanna Akerman en *Queen Christina of Sweden and her Circle. The Transformation of a Seventeenth-Century Philosophical Libertine.*

Aquí nos interesa su entrega a la promoción del conocimiento. El primer paso consiste, obviamente, en percatarse del problema, es decir, en su propia formación. Estudia lenguas clásicas, se aficiona a las matemáticas, reune una espléndida biblioteca, con abundantes manuscritos traídos de París, Atenas y Amsterdam, y congrega en Estocolmo, de extrema pobreza cultural entonces, una pléyade variopinta de artistas, filósofos y científicos. Con todos se relaciona y de todos está dispuesta a aprender; también a poner en duda. Método este último que le enseña personalmente Descartes, hasta el punto de que Ernst Cassirer ve en esa influencia la raíz última de su conversión, idea de la que se aleja Akerman.

Sus lecturas, y disputas, más frecuentes tienen que ver con la filosofía cartesiana, el epicureísmo y el atomismo de Gassendi. Da especial impulso a la historia gótica de su pueblo, para lo que bucea en el origen de las lenguas, un tema que entonces provocaba pasiones en Europa y que, no hemos de perder de vista, estaba vinculado a la posible existencia de una humanidad preadamita y a la tradición hermética que marcaba una línea de continuidad entre los escritos egipcios y la ley mosaica.

En el ámbito institucional, se le debe a Cristina la creación de la Academia de Estocolmo, más cercana todavía a la idea de mecenazgo renacentista que a una moderna sociedad dedicada al fomento de las ciencias experimentales. Mandó a Descartes que redactara los estatutos de la nueva institución, que comenzó a reunirse semanalmente en 1650; propuso, asimismo, la creación de otra paralela para, a imagen de la francesa, dedicarse a la promoción del idioma sueco.

Pero ya en Roma, aceptó el patrocinio de la recién fundada *Accademia dell'Esperienza Fisico-Matematica*, cuyas sesiones se celebraban en su palacio y a la que donó instrumentos científicos, microscopios y un observatorio. Había financiado antes el estudio de los cometas realizado por Cassini, como más tarde protegería a Borelli y a Malpighi, o abriría las puertas a la introducción de la teoría newtoniana.

Marie B. Hall lleva cuarenta años largos dedicada a la investigación de la Regia Sociedad. A ella y a su marido, A. Rupert Hall, le debemos una antológica correspondencia de Henry Oldenburg, secretario de origen alemán de esa institución durante un período excepcionalmente fecundo. En *Promoting Experimental Learning* acomete el estudio de la auténtica razón de ser de la Regia Academia, su mandamiento baconiano de dedicarse a la investigación experimental, a la experimentación. Rezaba, así, en efecto, un punto de los estatutos: "Será misión de la sociedad en sus reuniones ordinarias determinar, tomar nota, reflexionar y disertar a propósito de observaciones y experimentaciones filosóficas (es decir, científico-naturales); hacer pública lección, escuchar y comentar las cartas, informes y otras notificaciones relativas a asuntos filosóficos; así como mostrar las rarezas de la naturaleza y el arte, y disertar sobre ellas; por ende, considerar qué poder deducir de todas ellas o de cualquiera de las mismas; y alegar hasta qué punto todas o alguna pueden mejorarse a través del empleo o del descubrimiento."

Pero, ¿fue acaso ese párrafo fundacional una declaración de intenciones o tuvo algún efecto real? Por lo que ha llegado a convertirse, alta congregación honorífica de difícil acceso, diríase que la situación actual difiere muchísimo de los momentos iniciales. Lo que, por otro lado, y dado el curso seguido por la investigación científica, carece de la mayor importancia. Sí la tiene, por contra, el giro que ello supuso en la valoración de la experimentación como fuente de saber y de confirmación o refutación de hipótesis. La influencia de ese cambio no se circunscribió a Inglaterra. M. Boas Hall consagra el último capítulo de la obra a los lazos de la Regia Sociedad con Francia, Alemania, Italia y los Países Bajos; en el mismo canal de información viajaba, como presumirá el lector, la óptica y la mecánica newtonianas. (Silencia la autora toda referencia a España. ¿Quedó nuestro país al margen? Aunque la historia de nuestra ciencia en la segunda mitad del XVII y primera del XVIII no ha recibido suficiente atención, hay dos hechos que nos parecen incontrovertibles a este respecto: hubo relación epistolar de españoles con societarios londinenses y la información inversa estuvo mediatizada por razones políticas.)

El quehacer experimental de la "Royal Society" se personifica en Robert Hooke, hombre de rara habilidad manual, paciencia y capacidad de observación. También él encarna, con su decantación final por el discurso conceptualista y la explicación descriptiva, la tentación permanente de la institución: la de buscar refugio y excusa en el terreno más gratificador de las hipótesis y teorías.

En su estudio, la autora se ciñe a las actas de las sesiones realizadas en dos períodos, de 1660 (año de la fundación de la academia) a 1674 y de este último año hasta 1703. A modo de extensión, dedica sendos capítulos a la propagación o difusión de los experimentos. Año tras año vamos asistiendo al desarrollo de los capítulos fundamentales de la física del XVII.

Junto a los esperados informes sobre eclipses y relatos de viajes (climas, mineralogía, fauna y flora y técnicas de países lejanos), se suceden los relativos a la medición del peso en alturas variables o en oquedades subterráneas, el pulido de lentes, la estructura cristalina de las sales, causas de los cambios de la variación magnética, propagación del calor. La actividad rutinaria no se ciñó a la pura exhibición del experimento. Las reuniones cobraron vigor teórico con las disertaciones sobre la gravedad, con la lectura pública de las cartas de Leeuwenhoek y demás corresponsales del continente, así como con las disputas químicas (sobre el fósforo y sus clases).

Se insistió durante bastante tiempo en los ensayos fisiológicos, vegetales y animales, en particular en la transfusión sanguínea entre individuos de una misma especie y entre individuos de especies distintas (léase de animales a humanos, que se prohibieron muy pronto).

Portavoz de la primera hornada de trabajos fueron los escritos de Robert Boyle, desde su primer tratado: *New Experiments, Physico-Mechanical, Touching the Spring of the Air and its Effects*. Sin olvidar, por supuesto, otras obras de distintos miembros y oficiales, y, por encima de todas, el boletín de la sociedad, las *Philosophical Transactions*.

Desde un comienzo, la Real Academia de Ciencias de París se propuso una tarea en la que se viera

involucrada la corporación en pleno: preparar una flora general de acuerdo con una nueva visión de la ciencia de la botánica. Alice Stroup, autora de un libro sobre las cuentas de la institución ya comentado en esta misma revista, dedica el grueso de *A Company of Scientists* a la gestación, desarrollo y fracaso parcial de ese objetivo.

Para sacar el máximo provecho de su lectura, y adentrarse en el día a día y en la mirada a largo plazo de la corporación parisiense, lo ideal sería tener a mano las *Memoires pour servir à l'Histoire des Plantes*, acta más o menos oficial del desarrollo de los trabajos. En la "advertencia preliminar" Dodart expone concisamente lo que Stroup irá desentrañando con inteligencia: "Este libro es obra de toda la Academia. No hay miembro de la corporación que no haya sido su juez, ni haya aportado al menos algún consejo. Los académicos du Clos, Borrel, Perrault, Galois y Mariotte lo han examinado en su pormenor. La materia de este libro es el resultado de las proposiciones, los experimentos y las reflexiones de distintos componentes de la Asamblea. Es, pues, mi obligación advertir que lo concerniente a la química se debe, en buena medida, a du Clos y Borel; que Perrault y Mariotte le han dedicado desvelos y reflexiones; que Bourdelin ha realizado y dirigido casi todos los ensayos químicos..., y que Marchand ha puesto su atención y su red de corresponsales en las plantas raras..."

Se suma Stroup a la distinción entre inquisición externalista, la que contempla las relaciones de la ciencia con la sociedad, e inquisición internalista, la que hilvana el origen y asentamiento de las ideas. El caso más evidente de la segunda corriente sería el de la revolución científica, que suele reducirse simplistamente al cambio operado en física. Defiende ella, por contra, el cambio radical registrado en biología: enfoque químico de la botánica y aprehensión, por parte de ésta, de los modelos zoológicos y médicos (empleo de la analogía animal como recurso metodológico y explotación de la circulación harveyana), así como de los refinamientos técnicos (uso de la lupa y el microscopio).

No importa ya multiplicar dos, tres o cuatro veces el número de especies identificadas o acopiar rarezas en los jardines, sino descubrir criterios de sistematización y afinidad entre plantas. La Academia de París apostaba por la investigación química, en particular por la destilación que diera los componentes últimos de cada individuo. Cierto es que no siempre se extraían productos puros, pero eso podría salvarse mejorando los procesos y ajustando las temperaturas en las sucesivas decantaciones. Razones económicas y de otra índole (con Tournefort aquí como villano) impidieron que llegara a buen puerto el programa académico. (L. A.)

Ecología

Islas como modelo

Ecología insular, por M. L. Gorman. Vedra; Barcelona, 1991.

Aunque el título sugiere una monografía para especialistas en islas, el libro versa sobre el funcionamiento general de la naturaleza. La información se estructura en ocho capítulos, con el primero a modo de sucinta introducción. En el segundo se analizan los mecanismos de dispersión, imprescindibles para el establecimiento de los organismos en un territorio. Se considera, luego, el número de especies que subsisten en un territorio como resultado del equilibrio entre las que llegan y las que desaparecen por azar y por competencia.

A partir de aquí, el autor distingue entre islas próximas e islas distantes del continente. En las islas próximas la afluencia de especies es mayor y el solapamiento de nichos más elevado, motivando una mayor segregación espacial y temporal. Por contra, sobre las islas muy distantes del continente afluyen menos especies y el solapamiento de nichos es reducido, favoreciéndose la diferenciación específica. En los tres últimos capítulos del libro se abordan cuestiones de carácter aplicado sobre la facilidad de extinción de las especies insulares, la analogía entre islas y ciertas áreas continentales, y la aplicación de algunos principios de ecología insular a la gestión de áreas naturales.

El estilo del libro es sintético como si se tratara de un manual, pero resulta más ameno gracias a que la información se organiza según una secuencia ideal sobre la dinámica de las poblaciones naturales, que no se corresponde con la real ni con la secuencia del descubrimiento de estos conocimientos, pero que facilita la comprensión de los hechos. Sólo se echa en falta una mayor referencia al contexto científico en el que se desarrollaron las investigaciones referidas.

Los naturalistas plasmaban sus investigaciones en libros de viajes que completaban con análisis más sistemáticos en forma de historia natural. Pero sólo algunos realizaron síntesis más generales. Tal es el caso de "Filosofía Zoológica" de Lamarck, de "El Origen de las Especies" de Darwin y de la "Teoría sobre Biogeografía Insular" de MacArthur y Wilson, libro éste que ha inspirado muchos de los planteamientos sobre ecología insular. Las islas desempeñan en la teoría ecológica un papel similar al ejercido por *Drosophila melanogaster* en el desarrollo de la genética.

Los físicos, los fisiólogos y los agrónomos analizan habitualmente sistemas más simples que los ecólogos. Disponen también de mejores condiciones experimentales para variar ortogonalmente algunos factores (riego, abonado) sobre unidades experimentales bien delimitadas (tiestos, parcelas). Los ecólogos no pueden modificar los factores ecológicos implicados en sus experimentos ni delimitar con precisión las estaciones de estudio sin falsificar las condiciones experimentales. Han de limitarse a aprovechar los resultados que ofrece la naturaleza (experimentos dados) y a seleccionar las observaciones que mejor se adecuen al diseño experimental que hubieran deseado. Pero, aun así subsistiría el problema relativo a los límites y tamaño de las estaciones sino fuera por la amplia variedad de situaciones (de distancia al continente y de tamaño) de los sistemas insulares que permiten controlar la significación de factores como la dispersión y el solapamiento de nicho.

Las islas continúan ofreciendo innumerables ventajas a la investigación ecológica. Su análisis sobre gradientes geográfico-ambientales (latitud, longitud, tamaño y distancia al continente) permite contrastar la significación de factores abióticos (temperatura, precipitación), de factores bióticos (capacidad de dispersión, competencia y solapamiento de nichos) y de sus interacciones de una forma más eficiente que trabajando sobre áreas continentales. Y, así como este tipo de información sugirió a Darwin la importancia de la selección natural en la evolución, cabe esperar que continúe estimulando la creatividad de los investigadores sobre nuevas concepciones. Entre ella cabría sugerir interpretaciones más simples que las actuales sobre la variación de la biodiversidad. (J. P. N.)

Ensayo

Otto E. Landman

Pero, ¿existe la herencia lamarckiana?

¿Pueden transmitirse a las generaciones futuras los cambios adquiridos por los organismos a instancias del medio? ¿Desempeña la herencia de los caracteres adquiridos un papel significativo en la evolución? La mayoría de los biólogos daría una respuesta negativa a la primera cuestión, vaciando de sentido, por ende, el segundo interrogante.

Jean Baptiste de Lamarck, naturalista francés cuyo nombre va asociado a la tesis de la herencia de los caracteres adquiridos, creía que el uso o el desuso de un órgano condicionaba el desarrollo del mismo en la descendencia. Aducía el caso del cuello de las jirafas, cuya longitud atribuía al esfuerzo de sus antepasados para alcanzar las hojas cada vez más altas. Pero la genética y la biología molecular han demostrado que las adaptaciones experimentadas por una parte del organismo no pueden instar cambios en las células que transmiten los rasgos: espermatocitos y ovocitos.

Pese a ello, hay cambios inducidos por el entorno que sí son heredables. Fijémonos en las bacterias durante su crecimiento; las enzimas sintetizan y degradan simultáneamente las rígidas paredes celulares. Si un microbiólogo elimina de la bacteria dicha pared, se rompe el equilibrio entre la síntesis y la degradación, de suerte tal que la bacteria crece y se multiplica indefinidamente sin ese componente celular. Vale decir, la desnudez bacteriana adquirida se transmite a la progenie.

Oxytricha es un protozoo que produce de vez en cuando "monstruos dobles", dos individuos fusionados a modo de gemelos siameses. Dividamos longitudinalmente el monstruo en dos; las mitades resultantes se reproducirán y darán una descendencia normal. Cortémoslo transversalmente; cada parte originará un monstruo doble, que a su vez producirá más monstruos dobles.

La ausencia heredada de paredes celulares en las bacterias y la condición de monstruo adquirida por casualidad en *Oxytricha* son consecuencia de cambios estabilizados en la expresión de la actividad génica, sin modificaciones concomitantes en los propios genes.

Asistimos a una clase distinta de cambio heredable que viene inducido por el ambiente cuando de un organismo se eliminan, o se le añaden, grupos específicos de genes. Citemos el ejemplo del virus sigma, causante de la sensibilidad de las moscas de la fruta al dióxido de carbono. Las moscas infectadas transmiten el virus a su descendencia, a no ser que, mientran producen los huevos, las sometamos a unas condiciones de temperatura que maten el virus; las crías nacidas opondrán resistencia al dióxido de carbono.

No siempre se muestra tan palmaria la distinción entre un organismo y su compañero de viaje evolutivo. *Euglena* posee cloroplastos, orgánulos autorreplicativos que realizan la fotosíntesis. Si sometemos el protozoo a un tratamiento de estreptomicina durante seis días, pierde los cloroplastos. Sin éstos, *Euglena* llevará su propia vida y transmitirá a su progenie la nueva condición de incapacidad fotosintetizadora.

Encontramos también el reverso de la moneda, la adquisición de orgánulos autorreplicativos foráneos. Los plásmidos son unos anillos de ADN que suelen presentar las bacterias. Si agregamos un ejemplar de *Escherichia coli* que porte el factor de fertilidad F a un medio con *E. coli* carente de dicho plásmido, F se propaga con rapidez por todo el cultivo, que lo hará suyo y hereditario. También los virus pueden transmitirse a la descendencia y convertirse en parte permanente del legado de un organismo. Se ha calculado, a este propósito, que los cromosomas de ratón contienen unos 25.000 genes procedentes de retrovirus, adquiridos a través de los siglos por vía de infección. Hay muchos ejemplos más. Los biólogos convienen en aceptar que las células complejas adquirieron la capacidad fotosintetizadora cuando una de ellas, en un pasado remoto, se fusionó con una bacteria dotada de ese carácter. Los descendientes de la bacteria en cuestión son los cloroplastos de las plantas.

Si incluimos en el dominio de los caracteres adquiridos los genes foráneos introducidos a través de infecciones víricas, los plásmidos y las bacterias, resulta evidente que semejantes apropiaciones han desempeñado un papel fundamental en la evolución. Habida cuenta de que los genes de las bacterias o de los plásmidos han dispuesto de millones de años para crear sistemas coordinados, sus bancos de genes pueden conferir a los nuevos huéspedes unas capacidades, plenamente desarrolladas (como la fotosíntesis), que tardarían eones en evolucionar por sí mismas a través de mutaciones aleatorias asociadas a la selección natural.

Yo dividiría los genes de los organismos en dos grupos. La mayoría de ellos se hereda "verticalmente" de los antepasados. Pero algunos se han ido adquiriendo "horizontalmente" de los virus, los plásmidos, las bacterias u otros agentes. Los biólogos comienzan ya a percibir en la naturaleza esa transmisión horizontal de los genes incluso entre organismos sin relación de parentesco: de las bacterias a las plantas y de las bacterias a las levaduras. A nadie se le escapa que la naturaleza se nos ha anticipado en los secretos de la ingeniería genética.

Pese a la documentación sobreabundante de pruebas en favor de la herencia de los caracteres adquiridos, no he encontrado una sola alusión a su existencia en la revisión de una treintena de manuales de genética contemporáneos que acabo de realizar. Por citar un botón de muestra: "queda descartada la hipótesis lamarckiana de la herencia de las modificaciones adquiridas porque un mecanismo molecular que hiciera posible esa herencia ni existe ni puede imaginarse."

La actitud escéptica ante la herencia de los caracteres adquiridos reflejada en esta cita cristalizó en la atmósfera que dominó los debates politizados entre los genéticos de Occidente y el mejorador socialista Trofim D. Lysenko. Lysenko, que controló la investigación agrícola y genética de la antigua Unión Soviética durante los años cuarenta y cincuenta, se aferró a las ideas de Lamarck sobre la herencia por razones marxistas. Insistía en que se podía infundir propiedades útiles en las plantas "entrenándolas"; no existían, según él, los genes. Su error lo pagó caro la agricultura soviética. Pero los biólogos no han sabido ver la aguja en toda la paja lysenskoísta. Los grandes avances registrados en biología molecular han demostrado que la herencia de los caracteres adquiridos coexiste armónicamente con la genética molecular.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



ARCHIVOS SUBTERRANEOS DEL CLIMA CAMBIANTE, por Henry N. Pollack y David S. Chapman

Los pozos perforados en la roca continental permiten reconstruir temperaturas fósiles que revelan el clima de eras pasadas. Los resultados requieren una cuidadosa interpretación.

RADIOGALAXIAS REMOTAS, por George K. Miley y Kenneth C. Chambers

Los astrónomos han identificado potentes galaxias con emisión en radio cuya existencia se remonta a la época en la que el Universo sólo contaba una décima parte de su edad actual. Estos objetos permiten vislumbrar la evolución temprana de las galaxias gigantes.

EL CENTROSOMA, por David M. Glover, Cayetano González y Jordan W. Raff

A través del ensamblaje del armazón, este orgánulo gobierna la división, la motilidad y la morfología de la célula. Empieza ya a dominarse su estructura y función.

FUTURO DEL TRANSISTOR, por Robert W. Keyes

Hasta ahora ninguna barrera teórica ha podido frenar la reducción en tamaño y coste.

EL GRAN POZO DE CHINA, por Hans Ulrich Vogel

Hace más de siglo y medio los chinos perforaron a una profundidad de un kilómetro para extraer salmuera y producir sal. El pozo fue la culminación de ocho siglos de tecnología.

LA MONOGAMIA Y LA RATILLA DE PRADERA, por C. Sue Carter y Lowell L. Getz

Estudios de la ratilla de pradera (un tímido animal parecido a un ratón) han revelado que hay hormonas que pueden ser responsables del comportamiento monógamo.

EL AUTISMO, por Uta Frith

Las personas autistas padecen una alteración biológica. Aunque no pueden ser curadas, mucho puede hacerse para que lleven una vida más adaptada.

ECOLOGIA DE LOS RIOS MEDITERRANEOS, por Sergi Sabater, Francesc Sabater y Joan Armengol

Las variaciones de caudal propias de los ríos mediteráneos imprimen un carácter único a la dinámica fluvial. El biofilm superficial y la zona hiporreica desempeñan una función decisiva en el reciclado de los materiales.

